

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij naftnog rudarstva

# **LASERSKO BUŠENJE**

Diplomski rad

Marin Roguljić

N-223

Zagreb, 2018.

*Zahvaljujem svom mentoru Zdenku Krištaforu na stručnom vođenju i pomoći pri izradi ovog diplomskog rada. Neizmjereno hvala mojoj obitelji, djevojci i prijateljima na potpori koju su mi pružili tijekom studiranja.*

## LASERSKO BUŠENJE

MARIN ROGULJIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

### Sažetak

Laseri predstavljaju potencijalnu alternativu ili pomoć konvencionalnim metodama dosezanja i proizvodnje naftnih rezervi. Laseri mogu oslabiti, lomiti, topiti ili isparavati litološke jedinice, a lomljenje je energetski najučinkovitiji mehanizam uklanjanja materijala. Primjena laserske tehnologije kod izrade bušotina i operacija opremanja je privlačna zbog više razloga. Takva tehnologija ima potencijal smanjiti vrijeme bušenja, može stvoriti keramički oblog na stjenkama bušotine, time uklanjajući potrebu za zaštitnim cijevima. Također, mogu se poboljšati proizvodne karakteristike bušotine upotrebom novih metoda izrade perforacija laserima. Ovaj rad pruža uvid u laserski sustav, eksperimentalne postupke te analizu podataka dobivenih iz različitih litoloških uzoraka. Korištene su kamere velikih brzina u svrhu snimanja postupka penetracije lasera kroz vodu te na posljetku i kroz različite uzorke stijena. Ispitivanja su napravljena na Nd:YAG i CO<sub>2</sub> laseru, iako je u radu spomenuto još nekoliko vrsta lasera sposobnih za bušenje različitih litoloških jedinica.

Ključne riječi: Laser, lasersko bušenje, perforiranje, Nd:YAG, CO<sub>2</sub>

Diplomski rad sadrži: 75 stranica, 12 tablica, 38 slika i 18 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF

Dr. sc. Lidia Hrnčević, izvanredni profesor RGNF

Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF

Datum obrane: 22. veljače 2018., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

## LASER DRILLING

MARIN ROGULJIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

### Abstract

Lasers represent a potential means as an alternative or assist to conventional mechanical methods of reaching and producing petroleum reserves. High power lasers can weaken, spall, melt and vaporize various lithologies, with thermal spallation being the most energy efficient rock removal mechanism. Laser technology applied to well drilling and completion operations is attractive for many reasons. It has the potential to reduce drilling time, create a ceramic lining, thus eliminating the need for steel casing. It can also improve well performance by applying new methods of laser perforating. This thesis will provide a description of the laser system, experimental procedures and rock sample data analysis. High-speed cameras have been used to capture the processes of laser penetration through water and eventually the rock samples. These tests have been done using the Nd: YAG and CO<sub>2</sub> laser, although, there are other types of lasers capable of drilling through various lithologies that are also mentioned in the thesis.

Keywords: Laser, laser drilling, perforating, Nd:YAG, CO<sub>2</sub>

Thesis contains: 75 pages, 12 tables, 38 figures and 18 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Professor Zdenko Krištafor, PhD

Reviewers: Professor Zdenko Krištafor, PhD

Associate Professor Lidia Hrnčević, PhD

Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD

Date of defense: February 22, 2018, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
University of Zagreb

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. LASER I NJEGOVA SVOJSTVA .....	3
3. PRIJENOS ENERGIJE LASEROM .....	6
3.1. Vrsta stijene .....	7
3.2. Tip lasera .....	7
3.2.1. HF (vodik-fluorid) ili DF (deuterij-fluorid) laser .....	8
3.2.2. COI laser .....	8
3.2.3. CO <sub>2</sub> laser .....	8
3.2.4. CO laser .....	8
3.2.5. FE laser .....	9
3.2.6. Nd:YAG laser .....	9
3.2.7. KrF(ekscimer) laser .....	9
3.3. Kontinuitet laserske zrake .....	9
3.4. Specifična snaga lasera.....	10
3.5. Trajanje izlaganja zračenju.....	10
3.6. Optička vlakna.....	10
3.7. Plin za iznošenje krhotina.....	11
3.8. Specifična energija .....	11
4. RAZVIJANJE PROGRAMA ZA PRORAČUN POTREBNE ENERGIJE LASERA ZA RAZRUŠAVANJE STIJENA .....	13

5. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA PRIMJENE LASERA U IZRADI BUŠOTINA .....	16
5.1. Zračenje više bliskih točaka .....	17
5.2. Upotreba laserskog zračenja pod vodom.....	17
5.2.1. Metalna posuda.....	17
5.2.2. Stakleni bazen.....	18
5.3. Simulacija perforacije.....	20
5.4. Opis uzoraka stijena .....	20
5.4.1. Korišteni litološki materijal .....	20
5.4.2. Priprema uzoraka .....	20
5.5. Korišteni laseri .....	20
5.5.1. Nd:YAG laser .....	21
5.5.2. CO <sub>2</sub> laser.....	22
5.5.3. Mehanička postolja za uzorke .....	23
6. ZRAČENJE VIŠE BLISKIH TOČAKA ZA POVEĆANJE PROMJERA UDUBLJENJA .....	24
6.1. Postavke korištene opreme .....	24
6.2. Test djelovanja laserskog snopa u jednoj točki .....	27
6.2.1. Rezultati ispitivanja djelovanja laserskog zračenja u jednoj točki na pješčenjaku ...	27
6.2.2. Rezultati ispitivanja djelovanja laserskog zračenja u jednoj točki na šejlu.....	30
6.2.3. Rezultati ispitivanja djelovanja laserskog zračenja u jednoj točki na vapnencu .....	32
6.3. Test djelovanja laserskog snopa u više bliskih točaka .....	33

6.3.1. Rezultati ispitivanja djelovanja Nd:YAG lasera u više bliskih točaka na pješčenjacima .....	34
6.3.2. Rezultati ispitivanja djelovanja Nd:YAG lasera u više bliskih točaka na šejlu .....	37
6.3.3. Rezultati ispitivanja djelovanja Nd:YAG lasera u više bliskih točaka na vapnencu.	39
6.3.4. Rezultati ispitivanja djelovanja CO <sub>2</sub> lasera u više bliskih točaka na pješčenjaku .....	39
6.3.5. Rezultati ispitivanja djelovanja CO <sub>2</sub> lasera u više bliskih točaka na vapnencu .....	41
7. ISPITIVANJA NA UZORCIMA U TEKUĆINAMA.....	44
7.1. Vizualna procjena razrušavanja uzorka kroz sloj vode .....	45
7.2. Rezultati efekta debljine sloja slobodne vode iznad uzorka na razrušavanje Nd:YAG laserom .....	46
7.3. Rezultati efekta debljine sloja slobodne vode iznad uzorka na razrušavanje CO <sub>2</sub> laserom .....	51
7.4. Rezultati efekta poprečnog vodenog mlaza na razrušavanje Nd:YAG laserom .....	53
7.5. Rezultati efekta poprečnog vodenog mlaza na razrušavanje CO <sub>2</sub> laserom .....	54
8. PRIMJENA LASERA ZA PERFORIRANJE U BUŠOTINI.....	55
8.1. Primjena fiksnog laserskog snopa za izradu perforacija .....	56
8.2. Primjena kružnog snopa za izradu perforacija .....	58
8.3. Primjena rotacije uzorka za izradu perforacija .....	60
9. OVISNOST SPECIFIČNE ENERGIJE O VALNOJ DULJINI ZRAČENJA LASERA	63
9.1. Parametri ispitivanja valne duljine .....	63
9.1.1. Postavke korištene opreme .....	65
9.1.2. Ispitivanja na pješčenjaku.....	66
9.1.3. Ispitivanja na vapnencu .....	66

9.1.4. Ispitivanja na šejlu .....	66
10. KOMBINIRANI SUSTAV DLIJETA ZA ROTACIJSKO BUŠENJE I LASERA.....	68
10.1. Konfiguracije laserskog snopa.....	68
10.2. Laserska glava .....	71
10.3. Dodatna oprema.....	72
11. ZAKLJUČAK.....	73
12. LITERATURA .....	74



## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Osnovni dijelovi lasera .....	3
Slika 4-1. Dijagram toka algoritma .....	14
Slika 5-1. Metalna posuda sa zaštitnim poklopcem (gore) i bez zaštitnog poklopca (dole) .....	18
Slika 5-2. Stakleni bazen s vodenom mlaznicom .....	19
Slika 5-3. Skica Nd:YAG lasera korištenog u ispitivanjima u Argonne nacionalnom institutu .....	22
Slika 6-1. Shema uzoraka pulsiranja kod ispitivanja u više točaka.....	25
Slika 6-2. Skica različitih uzoraka zračenja.....	26
Slika 6-3. Ispitivanja u jednoj točki na uzorku pješčenjaka .....	28
Slika 6-4. Uzorci sivog Berea pješčenjaka nakon laserskog zračenja u više točaka .....	29
Slika 6-5. Ispitivanja u jednoj točki s više naleta na uzorku BG-A4 Top .....	30
Slika 6-6. Uzorak šejla Sh1 .....	31
Slika 6-7. Rezultati svih ispitivanja napravljenih na uzorcima šejla .....	32
Slika 6-8. Pomak uzorka za vrijeme zračenja.....	34
Slika 6-9. Ispitivanja na pješčenjaku u jednoj, dvije, tri i četiri točke.....	36
Slika 6-10. Uzorci BG-A5 I BG-A6. Ispitivanje broj 3 pokazalo je da razmak od 1,1 cm može ukloniti grube rubove između točaka (engl. <i>ridge</i> ).....	37
Slika 6-11. Najniža dobivena vrijednost specifične energije (SH1D-2, lijevo) i najviša vrijednost specifične energije (SH6D, desno) .....	38
Slika 6-12. Usporedba između rezultata CO <sub>2</sub> i Nd:YAG lasera na pješčenjaku .....	40

Slika 6-13. Vapnenac (LST4, lijevo) sa tri ispitivanja u tri točke i pješčenjak (BG-12-S, desno) .....	41
Slika 6-14. Ispitivanja CO <sub>2</sub> lasera na vapnencu .....	42
Slika 7-1. Vodena mlaznica poprečno postavljena iznad uzorka .....	45
Slika 7-2. Dimenzije udubljenja kao funkcija debljine vodenog sloja iznad uzorka sivog Berea pješčenjaka zračenog Nd:YAG laserom, rasporeda E8L2R100 .....	48
Slika 7-3. Dimenzije udubljenja kao funkcija debljine vodenog sloja iznad uzorka sivog Berea pješčenjaka zračenog Nd:YAG laserom, rasporeda E33L0,5R100 .....	49
Slika 7-4. Uzorak pješčenjaka za sve uvjete vodenog sloja .....	49
Slika 7-5. Dimenzije udubljenja kao funkcija debljine vodenog sloja iznad uzorka muljnjaka zračenog Nd:YAG laserom, rasporeda E32L0,5R100 .....	50
Slika 7-6. Dimenzije udubljenja kao funkcija debljine vodenog sloja iznad uzorka šejla zračenog Nd:YAG laserom, rasporeda E32L0,5R100 .....	51
Slika 7-7. Dimenzije udubljenja kao funkcija debljine vodenog sloja iznad uzoraka vapnenca, pješčanjaka i šejla zračenih CO <sub>2</sub> laserom u kontinuiranom režimu snage 4 kW .....	52
Slika 7-8. Udubljenja izbušena na uzorku šejla CO <sub>2</sub> laserom u kontinuiranom režimu snage 4 kW .....	52
Slika 7-9. Zračenje šejla Nd:YAG laserom kroz poprečni vodeni mlaz .....	53
Slika 7-10. Neuspjeli pokušaj laserskog snopa CO <sub>2</sub> lasera da razruši uzorak stijene .....	54
Slika 8-1. Postavke prve metode .....	57
Slika 8-2. Udubljenje na uzorku šejla promjera 2,54 cm i dubine 4,57 cm izbušena CO <sub>2</sub> laserom s četiri naleta u trajanju od 4 sekunde .....	58
Slika 8-3. Skica kružnog gibanja snopa (desno) i slika izbušenog udubljenja metodom kružnog snopa (lijevo) .....	59

Slika 8-4. Udubljenje na uzorku vapnenca izrađena CO <sub>2</sub> laserom snage 4 kW .....	60
Slika 8-5. Metoda rotacije uzorka.....	61
Slika 8-6. Rezultati perforiranja metodom rotacije uzorka. Lijevo: 4000 W i 3000 stupnjeva/min i desno: 2500 W i 10000 stupnjeva/min .....	61
Slika 9-1. Usporedbe valnih duljina CO <sub>2</sub> i Nd:YAG lasera na uzorku šejla .....	67
Slika 10-1. Lasersko-mehaničko žrvanjsko dlijeto s optičkim kabelom kao sustavom isporuke laserske energije do dlijeta.....	70
Slika 10-2. Poprečni presjek modificiranog žrvanjskog dlijeta.....	71

## POPIS TABLICA

Tablica 6-1. Rezultati djelovanja laserskog zračenja u jednoj točki na uzorcima pješčenjaka .....	27
Tablica 6-2. Rezultati laserskog zračenja u jednoj točki na uzorcima šejla .....	31
Tablica 6-3. Rezultati laserskog zračenja u jednoj točki na uzorcima vapnenca .....	33
Tablica 6-4. Rezultati zračenja u dvije, tri i četiri točke na uzorcima pješčenjaka .....	35
Tablica 6-5. Rezultati zračenja Nd:YAG laserom u tri točke na uzorcima šejla.....	38
Tablica 6-6. Rezultati zračenja u dvije i tri točke na uzorcima pješčenjaka. Laserska leća se pomicala prema dolje kako je bušenje napredovalo .....	40
Tablica 6-7. Rezultati ispitivanja CO <sub>2</sub> lasera na vapnencu .....	42
Tablica 7-1. Rezultati ispitivanja Nd:YAG lasera kroz vodeni sloj iznad uzorka .....	47
Tablica 8-1. Rezultati ispitivanja perforiranja. ....	56
Tablica 9-1. Laserski parametri za odabrane uzorke .....	64
Tablica 9-2. Rezultati ispitivanja valnih duljina.....	65
Tablica 10-1. Usporedba modula na zračenim i nezračenim uzorcima.....	68

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

$P_{\text{peak}}$  - vršna snaga ( $\text{kg}\times\text{m}^2\times\text{s}^{-3}$ )

$\tau$  - trajanje pulsa (s)

$Q$  - energija pulsa ( $\text{kg}\times\text{m}^2\times\text{s}^{-2}$ )

$F$  - frekvencija (1/s)

$T$  - trajanje intervala između početka pulsiranja lasera (s)

$P_{\text{avg}}$  - prosječna snaga ( $\text{kg}\times\text{m}^2\times\text{s}^{-3}$ )

$\theta_{\text{dif}}$  - granica difrakcije (rad)

$\lambda$  - valna duljina (m)

$D$  - promjer (m)

$Q$  - gustoća energije ( $\text{kg}\times\text{m}^{-1}\times\text{s}^{-2}$ )

$S$  - površina ( $\text{m}^2$ )

$I$  - gustoća snage ( $\text{kg}\times\text{m}^{-1}\times\text{s}^{-3}$ )

$P$  - snaga ( $\text{kg}\times\text{m}^2\times\text{s}^{-3}$ )

$E$  - ukupna energija ( $\text{kg}\times\text{m}^2\times\text{s}^{-2}$ )

$E_{\text{refleksije}}$  - energija refleksije ( $\text{kg}\times\text{m}^2\times\text{s}^{-2}$ )

$E_{\text{raspršenja}}$  - energija raspršenja ( $\text{kg}\times\text{m}^2\times\text{s}^{-2}$ )

$E_{\text{apsorpcije}}$  - energija apsorpcije ( $\text{kg}\times\text{m}^2\times\text{s}^{-2}$ )

$A_L$  - površina poprečnog presjeka laserske zrake ( $\text{m}^2$ )

$SE$  - specifična energija ( $\text{kg}\times\text{m}^{-1}\times\text{s}^{-2}$ )

$dV/dt$  - derivacija volumena po vremenu ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

d - dubina udubljenja (m)

w - širina udubljenja (m)

s - brzina pomicanja laserskog mehanizma (m/s)

R - najveća frekvencija (1/s)

L - raspon pulsa (s)

$E_p$  - najveća energija po pulsu ( $\text{kg} \times \text{m}^2 \times \text{s}^{-2}$ )

E/ms - maksimalna energija po milisekundi (J/ms)

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA

Laser – engl. *Light Amplification by Stimulated Emmision of Radiation*

HF – vodik-fluorid

DF – deuterij-fluorid

COIL – engl. *Chemical Oxygen Iodine Laser*

CO<sub>2</sub> – ugljični dioksid

CO – ugljični monoksid

FEL – laser sa slobodnim elektronima (engl. *Free Electron Laser*)

Nd:YAG – itrij-aluminijev granat dopunjen atomima neodimija

KrF – kripton-fluor

ANL – engl. *Argonne National Laboratory*

ROP – brzina bušenja (engl. *Rate of Penetration*)

NGOTP – engl. *Natural Gas and Oil Technology Partnership*

GRI – engl. *Gas Research Institute*

GTI – engl. *Gas Technology Institute*

DOE – engl. *Department of Energy*

NETL - engl. *National Energy Technology Laboratory*

MIRACL - engl. *Mid-Infrared Advanced Chemical Laser*

CSM – engl. *Colorado School of Mines*

PGC - engl. *Parker Geoscience Consulting*

PDVSA – španj. *Petróleos de Venezuela, S.A.* (engl. *Petroleum of Venezuela*)

$\text{SiO}_2$  – silicijev dioksid (kvarc)

PDC - engl. *Polycrystalline Diamond Compact*



# 1. UVOD

Rotacijsko bušenje se više od stoljeća koristi kao metoda izrade bušotina na većini naftnih polja diljem svijeta. Tijekom tog razdoblja predlagane su mnoge alternativne metode bušenja kako bi se smanjilo vrijeme izrade bušotina i povećala učinkovitost bušenja. Razmatrane alternativne metode uključuju bušenje mlazom, elektronskim snopovima, kavitacijskim mlaznicama, električnim lukom, plazmom i laserima. Unatoč evoluciji tehnologije rotacijskog bušenja i njenoj dokazanoj pouzdanosti i učinku i dalje postoje razni rizici i izazovi koji se odupiru daljnjem napretku u tom smjeru – od kojih je najvažnija zasigurno brzina bušenja (engl. *Rate of Penetration*, ROP). Mala brzina bušenja produljuje vrijeme završetka izrade naftne ili plinske bušotine što rezultira povećanim troškovima, obzirom da se bušača postrojenja unajmljuju na dnevnoj bazi. U skladu s tim, povećanje brzine bušenja može uvelike smanjiti troškove te pomaknuti granicu isplativosti projekta. Dugoročno, više bušotina može biti izrađeno u istom vremenskom okviru, što u kraćem roku dovodi do veće zarade.

Održavanje konstantne brzine bušenja pomoću mehaničkih dlijeta je jako teško, zbog toga što ona ovisi o brojnim čimbenicima kao što su radni uvjeti, reološka svojstva bušačkog fluida te karakteristike geološke formacije koja se buši i dlijeta koja se koristi. Nejednolika brzina bušenja povećava rizik skretanja od planirane trajektorije bušotine te bušaču postaje teško u kratkom vremenu odgovoriti na nestalne i nepredvidive uvjete u bušotini. Održavanje jednolike brzine bušenja na neki način osigurava praćenje vremenskog okvira projekta te tako daje prostora za uštede koje bi se inače uložile u produljenje najma bušačkog postrojenja i osoblja.

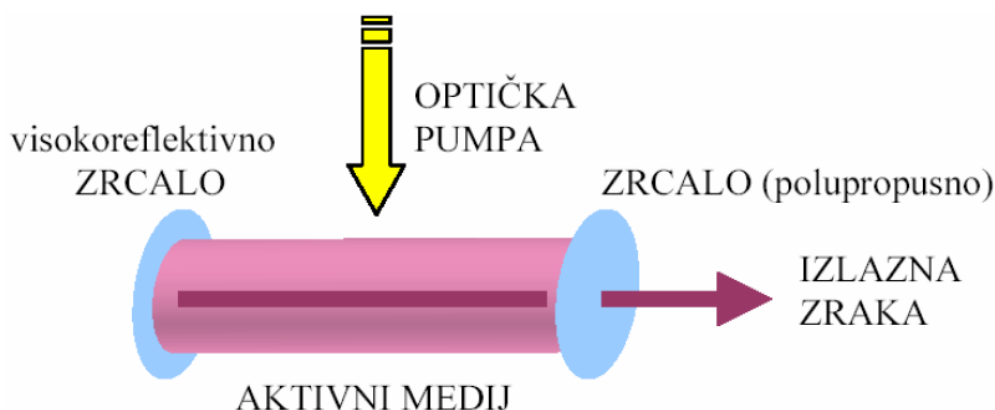
Laserska tehnologija ima potencijal smanjiti vrijeme bušenja, može stvoriti keramički oblog koji bi u budućnosti mogao eliminirati potrebu za čeličnim zaštitnim cijevima, a u slučaju laserskog perforiranja, može poboljšati proizvodne karakteristike bušotine. U razmatranju primjene laserske tehnologije prilikom izrade bušotina u obzir je uzeto nekoliko tipova lasera- CO<sub>2</sub>, COIL i Nd:YAG laser.

Tema ovog diplomskog rada je ispitivanje učinkovitosti i svojstava lasera kao potencijalnih alternativnih metoda bušenja. U radu su opisane vrste i karakteristike lasera, njihova primjena na uzorcima različitih stijena kao i rezultati ispitivanja učinkovitosti lasera u razrušavanju stijena. Opisan je i kombinirani sustav dlijeta za rotacijsko bušenje i lasera te

korištenje lasera za perforiranje u bušotini. Važno je napomenuti da su sva dosadašnja ispitivanja na temu primjene lasera u izradi bušotina napravljena u laboratoriju.

## 2. LASER I NJEGOVA SVOJSTVA

Laser je akronim od engleskog naziva *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Iako je Albert Einstein u svojim radovima 1917. godine predvidio induciranu stimuliranu emisiju elektromagnetskog zračenja, prvi je laser konstruirao Theodore Harold Maiman 1960.godine. Njegov je laser emitirao svjetlost valne duljine 694 nm u pulsnom režimu, a lasersku emisiju zračenja postigao je stimuliranom emisijom iz rubinskog kristala pobuđenog svjetlosnom lampom. Lasersko zračenje, u odnosu na zračenje običnih svjetlosnih žarulja, karakterizira koherentnost, usmjerenost i monokromatičnost. Koherentno zračenje je ono zračenje kod kojega svi svjetlosni valovi, od kojih je ono sastavljeno, titraju u fazi. Laserska zraka je usmjerena, dakle zračenje se rasprostire samo u relativno uzak prostorni kut, pa su i udaljenosti rasprostiranja takvog zračenja velike (Ban, 2008). Osnovne dijelove jednog lasera čine rezonator (dva ili više zrcala), aktivni laserski medij i optička pumpa, a shematski su prikazani na slici 2-1.



Slika 2-1. Osnovni dijelovi lasera (Ban, 2008)

Laseri mogu raditi u kontinuiranom, pulsirajućem i ponavljajućem pulsirajućem načinu. Najvažniji energetski parametar za laser u kontinuiranom načinu rada je izlazna snaga ( $P$ ), za laser u pulsirajućem načinu rada to je izlazna energija ( $Q$ ), a za laser koji radi u ponavljajućem pulsirajućem načinu najvažniji parametri su prosječna snaga ( $P_{avg}$ ) te izlazna energija ( $Q$ ) (Graves i O'Brien, 1998).

Trajanje jednog pulsa  $\tau$  kod pulsirajućih lasera može varirati od  $10^{-2}$  sekundi do nekoliko femtosekundi ( $10^{-15}$  sekundi) (Graves i O'Brien, 1998). Energija pulsa lasera je isto

tako karakterizirana vršnom snagom  $P_{peak}$  koja se definira kao omjer energije pulsa i trajanje pulsa (Graves i O'Brien, 1998):

$$P_{peak} = \frac{Q}{\tau} \quad (2-1)$$

pri čemu su:  $P_{peak}$  – vršna snaga,  $\text{kg} \times \text{m}^2 \times \text{s}^{-3}$

$\tau$  – trajanje pulsa, s

$Q$  – energija pulsa,  $\text{kg} \times \text{m}^2 \times \text{s}^{-2}$

Za ponavljajući pulsirajući način rada, prosječna snaga određena je energijom pulsa lasera i frekvencijom pulsa, gdje je  $f$  frekvencija, a  $T$  je trajanje intervala između početka pulsiranja lasera (Graves i O'Brien, 1998):

$$f = \frac{1}{T} \quad (2-2)$$

pri čemu su:  $f$  – frekvencija,  $1/\text{s}$

$T$  – trajanje intervala između početka pulsiranja lasera, s

$$P_{avg} = \frac{Q}{T} = P_{peak} \times \frac{\tau}{T} \quad (2-3)$$

pri čemu je:  $P_{avg}$  – prosječna snaga,  $\text{kg} \times \text{m}^2 \times \text{s}^{-3}$

Laserski snop karakteriziran je kutnom divergencijom  $\theta$ , koja se definira kao omjer promjera nefokusiranog laserskog zračenja i udaljenosti od lasera. Najbolja divergencija laserskog snopa je ograničena granicom difrakcije (Graves i O'Brien, 1998):

$$\theta_{dif} = \frac{\lambda}{D} \quad (2-4)$$

pri čemu su:  $\theta_{dif}$  – granica difrakcije, rad (za lasere visoke snage te se vrijednosti kreću u rasponu od 0.1-0.01 mrad)

$\lambda$  – valna duljina, m

$D$  – promjer, m

Niska divergencija laserskog snopa je bitna zbog dva razloga. Prvi je da laserski sustav može biti smješten dalje od zone razrušavanja, a drugi je da se laserski snop može fokusirati na jako malo područje.

Zračenje lasera koje je fokusirano na površinu stijene je karakterizirano gustoćom energije ili gustoćom snage (Graves i O'Brien, 1998):

$$q = \frac{Q}{S} \quad (2-5)$$

pri čemu su:  $q$  – gustoća energije,  $\text{kg} \times \text{m}^{-1} \times \text{s}^{-2}$

$S$  – površina,  $\text{m}^2$

$$I = \frac{P}{S} \quad (2-6)$$

pri čemu su:  $I$  – gustoća snage,  $\text{kg} \times \text{m}^{-1} \times \text{s}^{-3}$

$P$  – snaga,  $\text{kg} \times \text{m}^2 \times \text{s}^{-3}$

Zbog monokromatskih svojstava laserskog svjetla i mogućnosti fokusiranja na malu površinu, laseri imaju jedinstvene prednosti kod rasprskavanja, topljenja i isparavanja stijena ovisno o gustoći energije ili snage.

### 3. PRIJENOS ENERGIJE LASEROM

Tri su procesa kojima se energija lasera prenosi na stijene (Hafez et al., 2015):

- Refleksija;
- Raspršenje;
- Apsorpcija.

$$E = E_{refleksije} + E_{raspršenja} + E_{apsorpcije} \quad (3-1)$$

gdje je:

$E_{refleksije}$  – količina reflektirane energije

$E_{raspršenja}$  – količina raspršene energije

$E_{apsorpcije}$  – količina apsorbirane energije

Apsorbirana energija povećava temperaturu i potiče pucanje stijene, dok refleksija i raspršenje predstavljaju gubitak energije u procesu razrušavanja stijene laserom. Količina izgubljene energije u tom procesu određuje djelotvornost lasera prilikom lomljenja, topljenja ili isparavanja stijene na koju djeluje (Elahifar et al., 2011). Kako se zračenje apsorbira, dijelovima stijene koji su u kontaktu s laserskom zrakom brzo raste temperatura te se malo, ali značajno šire. Ekspanzija uzrokuje sudaranje pojedinih zrna, njihovo pucanje te na posljetku stvaranje malih pukotina. Ako je apsorbirana energija veća od raspršene, lokalna temperatura će se jako brzo povećati do točke taljenja stijene (Gahan et al., 2001). Konačan produkt toga je glatki staklasti oblog na stjenkama udubljenja (Elahifar et al., 2011). Ako se temperatura nastavi ubrzano povećavati, stijena će početi isparavati. Rasprskavanje je najpoželjniji način djelovanja laserske zrake na stijenu pošto ono maksimizira energiju utrošenu u pucanje stijene. U skladu s tim, da bi se povećala učinkovitost djelovanja lasera, potrebno je povećati količinu apsorbiranih zraka. Međutim, postoji nekoliko činitelja koji utječu na stupanj rasprskavanja stijene, kao što su vrsta stijene, tip lasera, kontinuitet laserske zrake i njena specifična snaga, učinkovitost optičkih vlakana u prenošenju laserskih zraka, trajanje izlaganja stijene laserskom zračenju te vrsta plina za čišćenje.

### 3.1. Vrsta stijene

Prirodna svojstva stijena značajno se razlikuju. Svojstva kao što su mineraloški sastav, veličina zrna, poroznost, propusnost, tlačna čvrstoća te otpor smicanju samo su neka od njih. Pješčenjak, koji se često koristi u laboratorijskim ispitivanjima primjene lasera u razrušavanju stijena, je sivi Berea pješčenjak poznat po homogenosti i konstantnim karakteristikama. To nisu ležišne stijene, koje su obično manje homogene. Uzorci vapnenaca i šejlova, koji su korišteni za ispitivanja primjene lasera u razrušavanju stijena, pokazali su puno veću promjenjivost sastava. U realnim uvjetima, vapnenci i šejlovi mogu mijenjati karakteristike svakih nekoliko centimetara. Još jedan problem karakterističan za šejlove je da je teško uzorkovati dovoljno debelu jezgru za ispitivanje, s obzirom da je šejl vrlo lomljiv po plohama slojevitosti. Većina testova na vapnencima napravljeno je na siluro-ordovicijskom vapnencu koji se koristio u izgradnji mnogih zgrada u Chicagu (Reed et al., 2003). Elahifar et al. (2011) pokazao je da granit može podnijeti veći intenzitet laserskog zračenja i pri tom ostati u zoni rasprskavanja u usporedbi s pješčenjakom, koji pri snazi laserskog zračenja većoj od 4.8 kW prelazi u zonu topljenja. Bjorndalen et al. (2003) je primijetio da je kod vapnenaca područje topljenja veće nego kod pješčenjaka. Šejl (škriljavac) po prirodi sadržava puno vezane vode koja apsorbira zračenje koje bi inače bilo iskorišteno za rasprskavanje stijene, time smanjujući učinkovitost lasera (Sinha i Gour, 2006)

### 3.2. Tip lasera

Izbor lasera za moguću primjenu u bušotinama je ograničen. Trenutno postoji sedam vrsta lasera koji se razmatraju kao moguće sredstvo za bušenje. To su (Graves i O'Brien, 1998):

- HF (vodik-fluorid) ili DF (deuterij-fluorid) laser
- COI laser
- CO<sub>2</sub> laser
- CO laser
- FE laser
- Nd:YAG laser
- KrF (ekscimer) laser

### 3.2.1. HF (vodik-fluorid) ili DF (deuterij-fluorid) laser

Vodik-fluorid i deuterij-fluorid laseri proizvode zrake valnih duljina između 2,6 i 4,2  $\mu\text{m}$ . Jedan od takvih je laser američke vojske pod imenom MIRACL (engl. *Mid-Infrared Advanced Chemical Laser*), korišten u ispitivanju pod imenom „*StarWars Laser Technology Applied to Drilling and Completing Gas Wells*” provedenom 1998. godine. Takav laser može 70 sekundi raditi snagom od 1 MW, što ga čini najjačim američkim laserom koji radi u kontinuiranom režimu (Sherman et al., 1998)

### 3.2.2. COI laser

COI laser (engl. *Chemical Oxygen Iodine Laser*) proizvodi zrake valne duljine od 1,315  $\mu\text{m}$  u kontinuiranom režimu. Razvijen je 1977. godine u laboratoriju američkih zračnih snaga, a od tada je evoluirao i koristi se u vojne i industrijske svrhe. Poznata je i njegova primjena u zrakoplovu za praćenje i uništavanje projektila na udaljenosti od gotovo 50 kilometara (engl. *Airborne Laser, ABL*) (Duffner, 1997).

### 3.2.3. CO<sub>2</sub> laser

CO<sub>2</sub> laser proizvodi zrake valne duljine od 10,6  $\mu\text{m}$  u kontinuiranom ili pulsirajućem režimu. Prosječna snaga mu je 1 MW. Kada radi u pulsirajućem režimu, duljine pulsa variraju od 1 do 30  $\mu\text{s}$  (Nanri i Fujioka, 1996). Značajna prednost CO<sub>2</sub> lasera je njegova trajnost i pouzdanost. Najveći nedostatak mu je relativno velika valna duljina jer se, prolaskom kroz optička vlakna, bitno ublažava njegovo djelovanje (Graves i O'Brien, 1998).

### 3.2.4. CO laser

CO laser proizvodi zrake valnih duljina između 5 i 6  $\mu\text{m}$  te, kao i CO<sub>2</sub> laser, može raditi u kontinuiranom ili pulsirajućem režimu. Proizvodi snagu do 200 kW, a duljina pulsa varira od 1 do 1000  $\mu\text{s}$  (Hilton i Jones, 1996). Rani CO laseri zahtijevali su hlađenje kako bi učinkovito proizvodili velike snage (neke verzije su čak kriogeno hlađene), jer se izlazna snaga jako brzo smanjivala. Tipičan rok trajanja je bio u najboljem slučaju nekoliko desetaka sati (Laser Focus World, 2015).



### 3.2.5. FE laser

Kod lasera sa slobodnim elektronima (engl. *Free Electron Laser*, FEL) kao aktivno sredstvo se ne koriste atomi ili molekule, nego slobodni elektroni koji se gibaju u posebno oblikovanom magnetskom polju. Zračenje je posljedica usporenja elektronskog snopa u magnetskom polju. FE laser radi u kontinuiranom režimu te ga se može postaviti na gotovo bilo koju valnu duljinu. Mogućnost podešavanja valne duljine lasera omogućila bi optimizaciju efekata refleksije, raspršenja i apsorpcije te efekata zračenja crnog tijela i plazmatskog oblaka (Graves i O'Brien, 1998).

### 3.2.6. Nd:YAG laser

Nd:YAG laser je laser s krutom jezgrom koji se sastoji od štapića itrij-aluminijevog granata (YAG), dopunjenog (engl. *doped*) atomima neodimija (Nd:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>). Energijska pobuda lasera čvrstog stanja je svjetlosna, a izvori svjetlosti su bljeskalice ili svjetiljke i laserske diode. Nd: YAG laser proizvodi zrake valne duljine od 1,06  $\mu\text{m}$ .

### 3.2.7. KrF(ekscimer) laser

Kripton-fluor laser je vrsta ekscimerskog lasera. Ekscimer (engl. *excited dimer* – pobuđeni dvoatom) je molekula koja je stabilna samo u pobuđenom stanju. Atomi kriptona i fluora u dvoatomskoj molekuli su vezani u pobuđenom stanju, ali ne i u osnovnom stanju. To svojstvo omogućava KrF laseru da radi u kontinuiranom režimu (Graves i O'Brien, 1998). Valna duljina zrake KrF lasera je 0,248  $\mu\text{m}$ , a maksimalna prosječna snaga 10 kW s duljinom pulsa od 0,1  $\mu\text{s}$  (Hecht, 1992).

## 3.3. Kontinuitet laserske zrake

Lasersko zračenje može biti neprekidno i pulsirajuće. Elahifar et al. (2011) je pokazao da neprekidno zračenje rezultira većom brzinom bušenja nego pulsirajuće, pod uvjetom da su ostali parametri konstantni. Ipak, primijetio je i da neprekidno zračenje puno brže dovodi do topljenja stijene, dok kod pulsirajućeg zračenja, zadržavanje u zoni rasprskavanja traje bitno duže.

### 3.4. Specifična snaga lasera

Bitan faktor brzine bušenja nije samo cjelokupna snaga lasera, već i specifična snaga koja je definirana kao omjer snage lasera i površine poprečnog presjeka laserske zrake (Gahan et al., 2001):

$$SP = \frac{P}{A_L} \quad (3-2)$$

gdje su:  $P$  – snaga,  $\text{kg} \times \text{m}^2 \times \text{s}^{-3}$

$A_L$  – površina poprečnog presjeka laserske zrake,  $\text{m}^2$

Kako se povećava specifična energija, više energije se prenosi na stijenu te se povećava brzina njenog razrušavanja sve do točke kada se mehanizam razrušavanja promijeni iz rasprskavanja u topljenje stijene.

### 3.5. Trajanje izlaganja zračenju

Što je izlaganje stijene zračenju duže, raste vjerojatnost za povećanje temperature iznad temperature rasprskavanja. Taj efekt je izraženiji u neprekidnom načinu rada lasera (Graves et al., 2002).

### 3.6. Optička vlakna

Pretpostavlja se da će promjer optičkih vlakana biti oko 1 mm te da će moći prenositi prosječnu snagu do 10 kW. U ispitivanjima koja su proveli Reed et al. 2003. godine, uzeta je malo konzervativnija vrijednost, gdje je prosječna snaga 6 kW. Vlakna koja se koriste u Nacionalnom laboratoriju Argonne u Chicagu (ANL) uparena s Nd:YAG laserom, rutinski prenose 2 kW prosječne snage s vršnim snagama do 32 kW. Komercijalno dostupna vlakna mogla bi prenositi toliku količinu energije s gubitcima prijenosa energije od 37% po kilometru (Reed et al., 2003).

### 3.7. Plin za iznošenje krhotina

Za razliku od konvencionalnog bušenja, u primjeni laserske tehnologije nije moguće korištenje tekućih isplaka (Hafez et al., 2015). Umjesto njih se, za iznošenje krhotina razrušenih stijena, koristi plin. Elahifar et al. (2011) je zaključio da plin za iznošenje krhotina na površinu ima utjecaja na brzinu bušenja, iako je taj efekt jako malen. U ispitivanjima razrušavanja stijena laserima je u te svrhe korišten dušik.

### 3.8. Specifična energija

Specifična energija (SE) koristi se za usporedbu različitih postavki lasera. Definirana je kao snaga potrebna za uklanjanje jediničnog volumena stijene (Sinha i Gour, 2006) te je pogodna za predviđanje svojstava i potrebne snage kada se laseri koriste kao jedino sredstvo za razrušavanje stijena. Što je stijena tvrđa i zbijenija, njena specifična energija je veća. Stoga je, kako je vapnenac zbijeniji od pješčenjaka i šejla, potrebno više energije da bi ga se razrušilo (O'Brien et al., 1999):

$$SE = \frac{P}{dV/dt} = \frac{P}{d \times w \times s} \quad (3-3)$$

pri čemu su: SE – specifična energija, J/m<sup>3</sup>

P – snaga, kg×m<sup>2</sup>×s<sup>-3</sup>

dV/dt – derivacija volumena po vremenu, m<sup>3</sup>/s

d – dubina udubljenja, m

w – širina udubljenja, m

s – brzina pomicanja laserskog mehanizma (engl. *traverse speed*), m/s

Iz specifične energije, koja se računa iz laboratorijskih ili terenskih ispitivanja, može se izračunati i ROP.

$$ROP = \frac{P}{A \times SE} \quad (3-4)$$

pri čemu je:  $A$  – površina poprečnog presjeka udubljenja napravljenog laserskom zrakom,  $m^2$

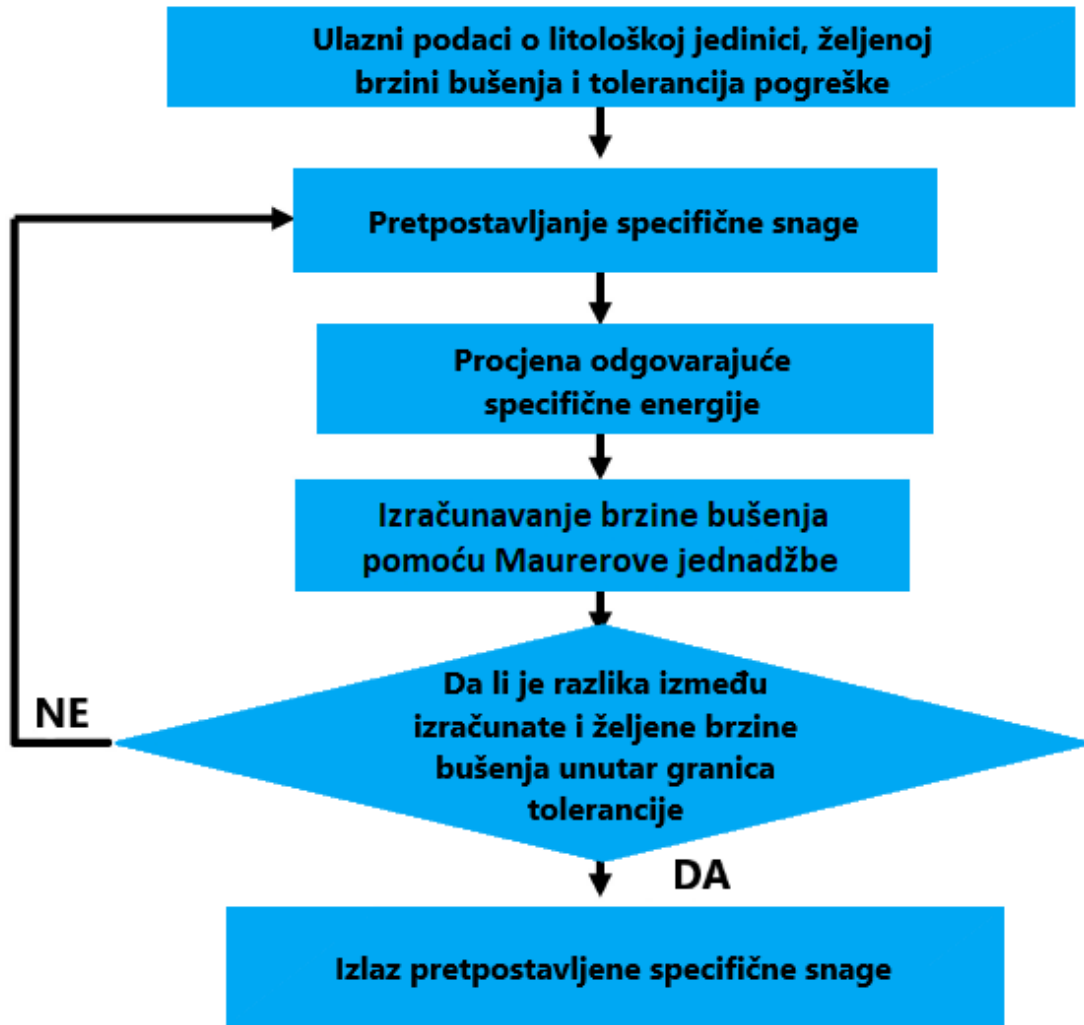
Sukladno tome, specifična energija može se izračunati i putem specifične snage i brzine bušenja za pojedine postavke sustava. Kako bi se povećala brzina bušenja, potrebno je smanjiti specifičnu energiju (Graves et al., 2002). Izračunata specifična energija je primjenjiva samo za parametre u kojima je testirana te se mijenja promjenom specifične snage, tipa lasera, vrste formacije i drugih ranije spomenutih faktora. Dosadašnji eksperimenti laserskog bušenja provedeni su jedino u laboratoriju na uzorcima jezgri stijena te do danas nije provedeno ni jedno terensko ispitivanje primjene lasera u naftnom rudarstvu. U nastavku rada su detaljno opisana dva tipa lasera, koja su se pokazala najučinkovitijima pri bušenju stijena -  $CO_2$  i Nd:YAG laser, kao i testiranja u tu svrhu provedene na njima.

## 4. RAZVIJANJE PROGRAMA ZA PRORAČUN POTREBNE ENERGIJE LASERA ZA RAZRUŠAVANJE STIJENA

A. Hafez je sa svojim suradnicima 2015. godine razvio kompjuterski algoritam koji pruža procjenu potrebne energije lasera za postizanje konstantne brzine bušenja. Algoritam je dizajniran da radi na temelju Maurerove jednažbe, koja uzima u obzir specifičnu snagu i specifičnu energiju:

$$ROP = \frac{SP}{SE} \quad (4-1)$$

Algoritam funkcionira na način da korisnik unese tri parametra kako bi program počeo izračunavanje: željenu brzinu bušenja, litološki sastav stijene i dozvoljeno odstupanje brzine bušenja od željene vrijednosti. Kako bi se dobila matematička korelacija između specifične snage i specifične energije lasera za pojedine vrste stijena, mogu se koristiti opsežne eksperimentalne analize. Program započinje pretpostavkom početnog intenziteta snage te potom identificira odgovarajuću specifičnu energiju iz matematičkih korelacija dobivenih iz eksperimenata. Te dvije vrijednosti se zatim koriste za procjenu brzine bušenja. Ako dobivena brzina bušenja nije jednaka ulaznom parametru, program radi iteracije, pretpostavljajući različit intenzitet snage u svakom koraku, sve dok brzina bušenja ne bude unutar zadanog postotka odstupanja. Kada se to postigne, program predlaže potrebnu specifičnu snagu. Na slici 4-1 prikazan je dijagram toka algoritma.



Slika 4-1. Dijagram toka algoritma (Hafez et al., 2015)

Uz gubitke energije laserske zrake zbog refleksije i raspršenja, javljaju se još dva fenomena koja utječu na prijenos energije lasera na stijenu (Graves i O'Brien, 1998):

1. Zračenje „crnog tijela“ – kada temperatura stijene naraste, sama stijena se pretvara u intenzivan izvor elektromagnetskog zračenja. Na velikim temperaturama površina stijene može emitirati značajnu količinu energije koja se naziva zračenje „crnog tijela“.
2. Plazmatski oblak (engl. *plasma screening*) – laseri velike snage mogu uzrokovati stvaranje laserske plazme (ionizirani plin) iznad zračene površine. Laserska plazma

reflektira, raspršuje i apsorbira zračenje i sprečava laserski snop da dođe do površine stijene.

## 5. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA PRIMJENE LASERA U IZRADI BUŠOTINA

Tijekom godina provedeno je nekoliko značajnijih istraživanja s ciljem dobivanja odgovora na pitanje – jesu li laseri pogodno i pouzdano rješenje za izradu bušotina? U nastavku su navedena najvažnija istraživanja, a na temelju podataka jednog od njih (ANL/NGOTP studija, 2002), napravljen je ovaj diplomski rad.

Istraživanje na kojem je temeljen ovaj rad je svojevrsni nastavak dvaju prijašnjih istraživanja. Prvu od njih pod nazivom „*Determining the Benefits of StarWars Laser Technology for Drilling and Completing Natural Gas Wells*“ napravio je *Gas Research Institute* (GRI), danas poznat pod imenom *Gas Technology Institute* (GTI). U istraživanju su korišteni vojni laseri velike snage:

1. 1.6 MW *Mid-Infrared Advanced Chemical Laser* (MIRACL);
2. 7 kW *Chemical Oxygen-Iodine Laser* (COIL);
3. 50 kW i 150 kW snažni CO<sub>2</sub> laseri.

Studija je pokazala da današnji laseri mogu razrušavati sve vrste stijena te da nisu potrebni laseri iznimno velike snage, tipa MIRACL.

### GTI/DOE studija, 2001

Druga studija koju je financirao Nacionalni energetske tehnološki laboratorij (engl. *National Energy Technology Laboratory, NETL*) koristio je 1.6 kW Nd:YAG i 6 kW snažan CO<sub>2</sub> laser. Iz istraživanja su proizašli rezultati minimalne količine energije potrebne za razrušavanje stijena te su dobiveni najdjelotvorniji laserski parametri za ispitane uzorke pješčenjaka, šejla i vapnenca.

### ANL/NGOTP studija, 2002

Sredstva dobivena za ovu studiju iskorištena su za razvitak bušaćeg sustava koji ima potencijal načiniti veliki preokret u naftnoj industriji te je na temelju rezultata ove studije napravljen ovaj diplomski rad. Provedena su razna ispitivanja razrušavanja stijena laserima, iz kojih su proizašli vrijedni zaključci koji će pomoći u razvitku takve tehnologije. U nastavku su opisani početni testovi i ideje na kojima se temelji cijela studija.



## **5.1. Zračenje više bliskih točaka**

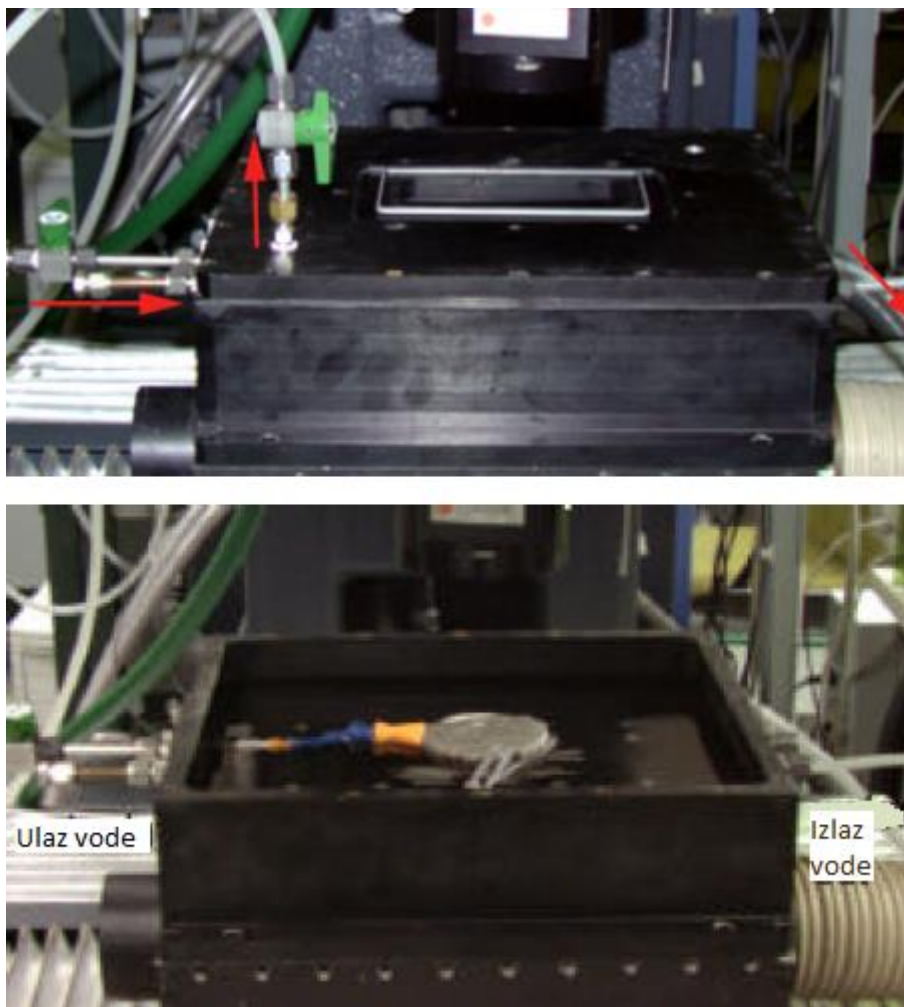
Početni testovi provedeni u okviru ANL/NGOTP studije, 2002. godine, sa svrhom ispitivanja svojstava lasera sastojali su se uglavnom od programiranja mehaničkih postolja da se miču po zadanim koordinatama u određenom vremenu. Ova serija testova napredovala je od uzastopnog laserskog zračenja u jednoj točki do zračenja u dvije, tri i četiri točke.

## **5.2. Upotreba laserskog zračenja pod vodom**

Konvencionalno bušenje obično uključuje korištenje bušaćih fluida (isplake) za podmazivanje i hlađenje pokretnih dijelova alata, iznošenje krhotina stijena te održavanje stabilnosti kanala bušotine, pri čemu se u bušaći fluid često dodaju različiti aditivi kako bi se postigla optimalna svojstva isplake. Cilj ove serije testova bio je odrediti sposobnost lasera da buši stijenu koja je uronjena u vodu na određenim dubinama. U testovima koje je proveo GTI, 2001. godine, zaključeno je da je učinkovitost lasera u vodom zasićenim stijenama ista ili bolja nego kod suhih uzoraka. Međutim, to nije dalo odgovor na pitanje mogu li laseri učinkovito bušiti kroz sloj vode iznad uzorka.

### **5.2.1. Metalna posuda**

Početni testovi napravljeni su u metalnoj posudi sa staklenim prozorom u pokušaju da se eliminiraju vanjski utjecaji (slika 5-1). Posuda, koja je zapravo prenamijenjena iz drugog projekta, pokazala se neuporabljivom nakon primjene malog tlaka koji je bio potreban za uklanjanje mjehurića zraka sa stakla. Staklo je počelo propuštati na spojnim mjestima, a potom je i puklo pod utjecajem vodenog mlaza i tlaka potrebnog za brtvljenje posude. Sustav se kao takav nije mogao upotrebljavati zbog sigurnosnih mjera, pa se koristio sustav s otvorenim poklopcem kao svojevrsni bazen.



Slika 5-1. Metalna posuda sa zaštitnim poklopcem (gore) i bez zaštitnog poklopca (dole)  
(Reed et al., 2003)

#### 5.2.2. Stakleni bazen

Idući stupanj početnih testova bio je stakleni bazen s vodenom mlaznicom postavljenom u vodu pod kutom od oko 60 stupnjeva u odnosu na površinu uzorka stijene (slika 5-2). Svrha mlaznice je bila da čisti površinu uzorka, kako bi laserski snop neometano mogao djelovati. Voda u bazenu stvorila je vrtlog koji je uzburkao vodenu površinu i previše raspršio laserski snop. Uzorci stijena su se razlikovali od zasićenog (bez vodenog sloja iznad površine), do uzorka s vodenim slojem od 5,08 cm.



Slika 5-2. Stakleni bazen s vodenom mlaznicom (Reed et al., 2003)

Uzorci na koje je primijenjeno lasersko zračenje u početnim testovima pokazali su da voda jako brzo apsorbira lasersku energiju putem nekoliko mehanizama. Voda, koja je prilično transparentan medij za Nd:YAG laser valne duljine zračenja  $1,06\ \mu\text{m}$ , apsorbirala je 90% njegove energije u vodenom sloju debljine 10 centimetara. Energija, koja dođe do površine uzorka stijene, zagrijava ga, ali toplina se jako brzo uklanja konvekcijom i kondukcijskim svojstvima vode. Energija  $\text{CO}_2$  lasera, zračenja valne duljine  $10,6\ \mu\text{m}$ , apsorbirana je puno brže. Laser gotovo kuha vodu i ako je vodeni sloj prevelike debljine (sve iznad  $2,54\ \text{cm}$ , temeljeno na početnim testovima), laserski snop ni ne dođe do uzorka (ispitano u kontinuiranom režimu, snage  $4\ \text{kW}$ ).  $\text{CO}_2$  laseri mogu biti jako snažni (do  $150\ \text{kW}$ ), što bi možda moglo omogućiti veće radne udaljenosti.

Mlaz vode, bilo da teče paralelno s površinom uzorka ili pod određenim kutom na istu, nije mogao spriječiti taloženje rastaljenog materijala na površini uzorka. Laserske zrake su uspjele penetrirati kroz vodene slojeve debljine do  $2,54\ \text{cm}$ , dok je  $5\ \text{cm}$  vode potpuno uništilo snop. Početni testovi dali su do znanja da se u slučaju zračenja uzoraka pod vodom neće moći napraviti kvantitativna analiza specifične energije, kako je napravljeno za suhe i zasićene uzorke.

### **5.3. Simulacija perforacije**

Projekt pod nazivom „*Determining the Feasibility of Drilling and Completion Gas Wells with High Powered Lasers*“, pokazao je da brzina razrušavanja stijene ubrzano pada s povećanjem dubine udubljenja.

U istraživanjima provedenim u sklopu navedenog projekta korišten je CO<sub>2</sub> laser promjera snopa od 1,27 cm i snage 4 kW. U navedenim istraživanjima su testirane tri vrste plina za pročišćavanje.

### **5.4. Opis uzoraka stijena**

#### **5.4.1. Korišteni litološki materijal**

Nakon studije GTI/CSM, gdje su ispitani razni uzorci stijena različitog litološkog sastava, odlučeno je usredotočiti se na vrste stijena koje se najčešće susreću prilikom izrade bušotina u naftnom rudarstvu. Pri tome je kao reprezentativni uzorak stijene, odabran sivi Berea pješčenjak. Raznolikost mineraloškog sastava vapnenaca i šejlova, čak i u istom uzorku, je velika, stoga je bilo teško naći konzistentne uzorke. Kako su ispitivanja napredovala, korišteni su uzorci koji bolje odgovaraju ležišnim stijenama.

#### **5.4.2. Priprema uzoraka**

Svi uzorci, osim vapnenca koji je bio nepravilnog oblika, su oblikovani u diskove promjera 7,62 cm,. Debljina uzoraka je varirala od 1,27 cm do 6,35 cm, ovisno o dostupnosti i namjeni.

### **5.5. Korišteni laseri**

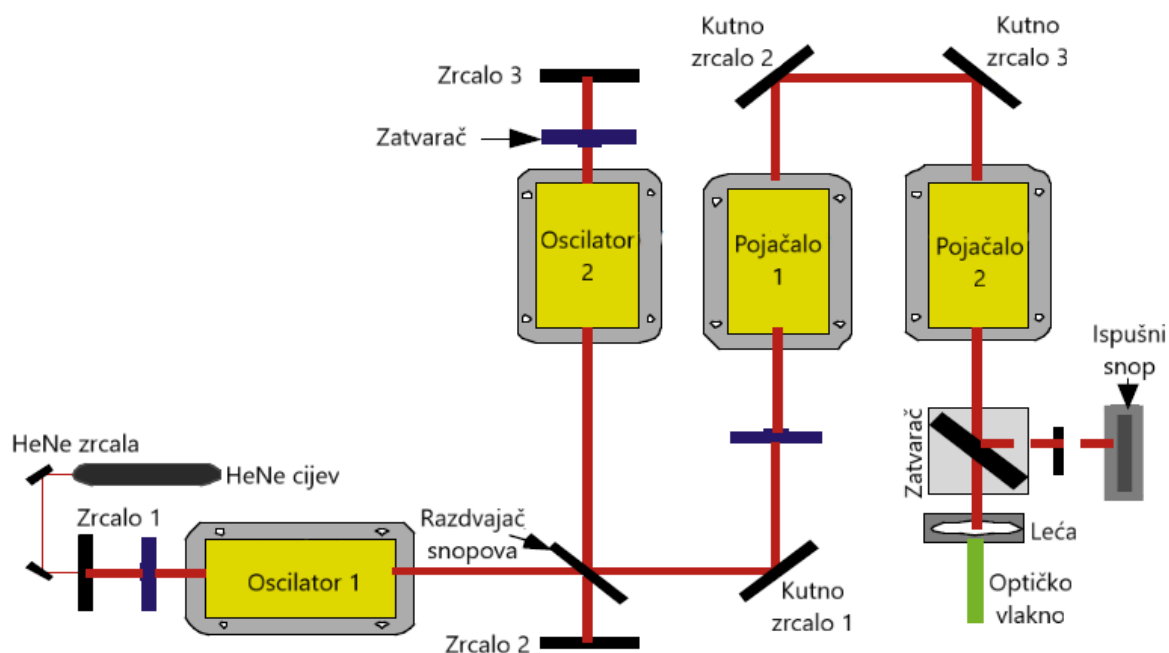
U narednim ispitivanjima korišten je CO<sub>2</sub> laser snage 6 kW, koji može raditi u kontinuiranom i pulsirajućem režimu te Nd:YAG laser, širokog raspona širina pulsa i broja ponavljanja. Svojstva ovih lasera opisana su u nastavku.

### 5.5.1. Nd:YAG laser

Nd:YAG je laser s krutom jezgrom koji sadrži dva oscilatora i dva pojačala (slika 5-3). Četverostupanjska rezonantna šupljina omogućava laserskim snopovima iz dvaju oscilatora da se spoje u jedan snop prije izlaza na optički kabel, čime je kvaliteta laserskog snopa poboljšana. Činjenica da se snop zračenja iz Nd:YAG lasera može prenositi optičkim vlaknima, čini ovaj laser idealnim kandidatom za izradu bušotina dubina većih od 3000 metara (Reed et al., 2003). Glavna svojstva ove vrste lasera navedena su u nastavku (Reed et al., 2003):

Valna duljina, $\lambda$	1,06 $\mu\text{m}$
Najveća prosječna snaga, $P_{\text{avg}}$	1600 W
Najveća frekvencija, R	800 ponavljanja u sekundi
Raspon pulsa, L	0,1 – 10 milisekundi
Najveća energija po pulsu, $E_p$	100 J
Najveća vršna snaga, $P_{\text{peak}}$	32 kW
Maksimalna energija/ms, E	32 J/ms

U nizu ispitivanja korišten je paralelni (engl. *collimated*) snop promjera 6,5 mm. Ovako mali promjer snopa stvoren je korištenjem leće žarišne duljine od 25 mm postavljene 25 mm od izlaza snopa. Tri su varijable pulsa koje se mogu mijenjati: energija po milisekundi (E), širina pulsa (L) i frekvencija u hercima (R). Na primjer, laser s rasporedom navedenih karakteristika E8L2R100 proizvodi snop zračenja od 8 J/ms, širine 2 ms, sa frekvencijom od 100 Hz. Prosječna izlazna snaga ( $P_{\text{avg}}$ ) jednaka je  $E \times L \times R$ , a vršna snaga ( $P_{\text{peak}}$ ) jednaka je  $E \times 1000$  (Reed et al., 2003). Za gornji primjer,  $P_{\text{avg}} = 1600 \text{ W}$ , a  $P_{\text{peak}} = 8000 \text{ W}$ .



Slika 5-3. Skica Nd:YAG lasera korištenog u ispitivanjima u Argonne nacionalnom institutu (Reed et al., 2003)

#### 5.5.2. CO<sub>2</sub> laser

CO<sub>2</sub> laser je plinski laser koji kao aktivni medij koristi molekule ugljikovog dioksida, gdje se CO<sub>2</sub> ne troši kao što je to slučaj kod COIL i MIRACL lasera. Ovaj laser ima najveću valnu duljinu zračenja od svih lasera koji su do sada testiranih u svrhu izrade bušotina. Njegova glavna svojstva navedena su u nastavku (Reed et al., 2003):

Valna duljina	10,6 $\mu\text{m}$
Najveća prosječna snaga	6 kW
Najveća vršna snaga	24 kW
Raspon pulsa	50 – 500 $\mu\text{s}$
Frekvencija pulsa	0 – 25 kHz

### 5.5.3. Mehanička postolja za uzorke

Oba lasera imaju postolja s pet osi. To znači da se uzorci mogu micati po osi apscise (x) i ordinate (y) te rotirati u bilo kojem smjeru, a laserska leća se može micati po osi aplikate (z). Z-os se koristi za kontrolu promjera snopa na površini uzorka, a u nekim je testovima korištena i za praćenje uzorka kako se dubina udubljenja, nastale djelovanjem laserskog snopa, povećavala, tako donekle simulirajući realne uvjete.

## 6. ZRAČENJE VIŠE BLISKIH TOČAKA ZA POVEĆANJE PROMJERA UDUBLJENJA

Temeljna saznanja koja su dobivena u prethodnim, već spomenutim, istraživanjima pokazala su da predugo zadržavanje laserskog snopa na jednom mjestu uzrokuje taljenje stijene i smanjenu učinkovitost njenog razrušavanja. Uz to, teško je zamisliti učinkovit način izrade bušotine promjera 20 centimetara korištenjem jednog laserskog snopa. Jedno rješenje koje se razmatra za oba problema je korištenje višestrukih laserskih snopova koji ne rade u isto vrijeme. Kako bi ovaj koncept dobro funkcionirao, potrebno je postići ravnotežu između broja mjesta koja se istovremeno izlažu laserskom zračenju (što više-to bolje) i vremena koje mora proći između zračenja (što duže-to bolje). Cilj je svakim zračenjem maksimalno povećati količinu razrušenog stjenjskog materijala, pritom ne uzrokujući početak taljenja stijene.

Ova serija ispitivanja je poduzeta u svrhu određivanja:

1. utjecaja mijenjanja vremena relaksacije (engl. *relaxation time*, vrijeme između završetka jednog i početka drugog naleta laserskog zračenja) na učinkovitost razrušavanja stijene jednim laserskim snopom,
2. veze između vremena relaksacije i broja zračenja s obzirom na početak taljenja stijene jednim laserskim snopom,
3. povećanja broja točaka zračenja,
4. površine preklapanja točaka zračenja nužnog za sprečavanje formiranja grubih rubova između snopova (engl. *ridge*).

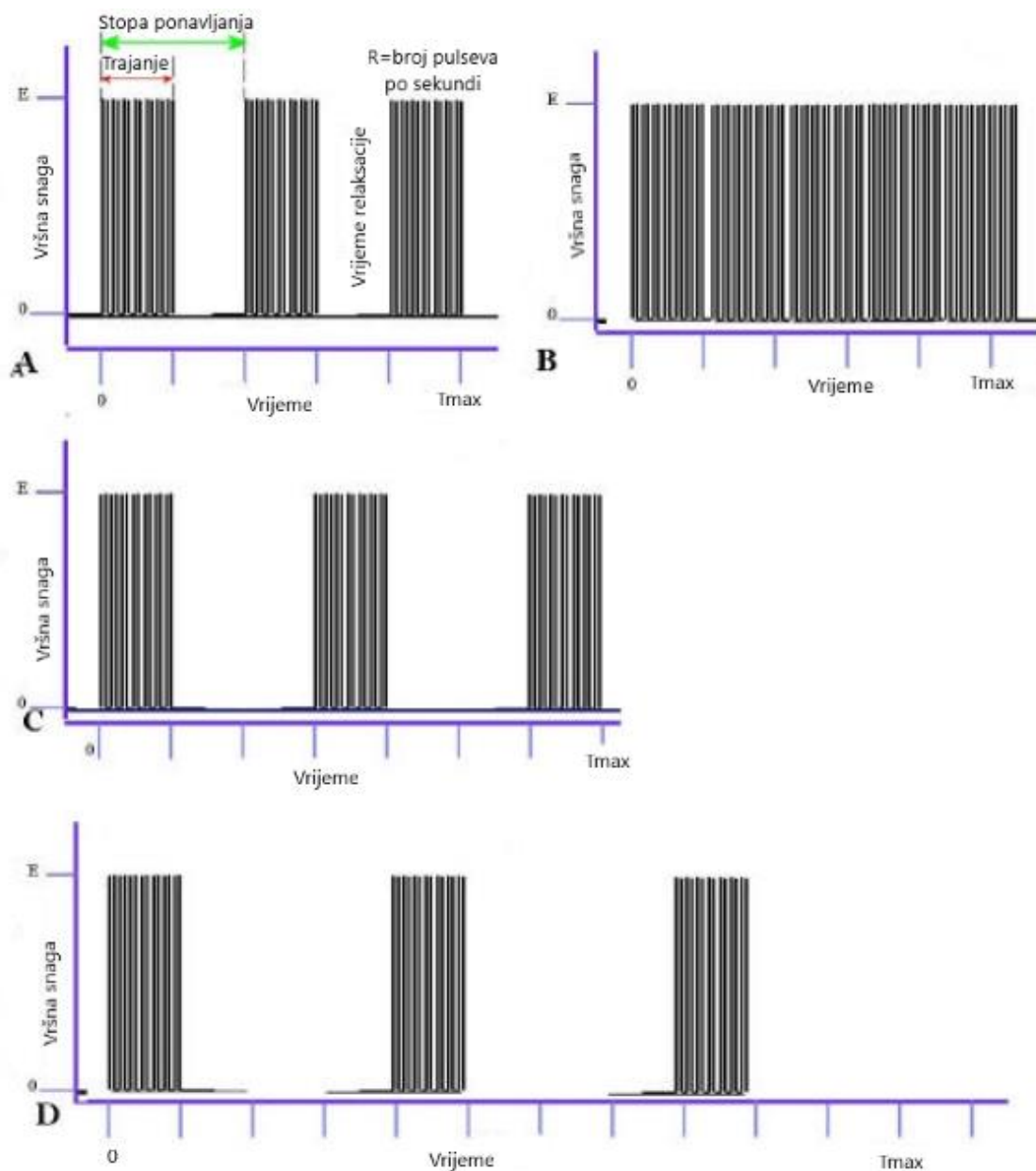
### 6.1. Postavke korištene opreme

Svi testovi napravljeni su korištenjem Nd:YAG i CO<sub>2</sub> lasera. CO<sub>2</sub> laser se pokazao osobito koristan za vapnenačke uzorke, jer mu veća prosječna snaga (4,5 kW, u usporedbi sa 1,5 kW kod Nd:YAG lasera) omogućuje veće promjere snopa, istovremeno zadržavajući potrebnu gustoću snage za razrušavanje.

Ispitivanja su rađena na suhim uzorcima stijena korištenjem laserskih parametara (vršna snaga, brzina ponavljanja, širina pulsa, promjer snopa i trajanje zračenja) koji su u ranijim istraživanjima dali rezultate za najbolju specifičnu energiju za pojedinu litološku



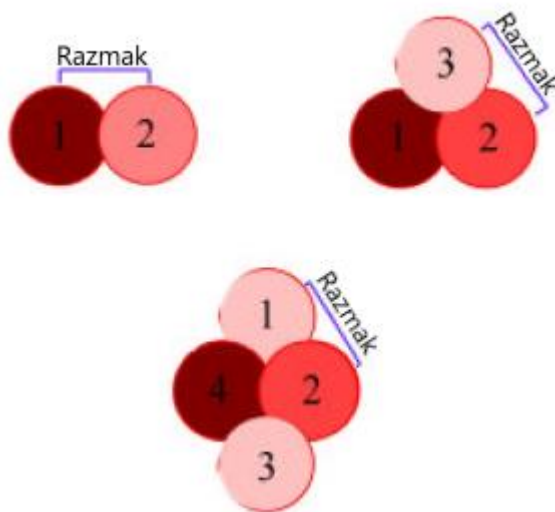
jedinicu. Vrijeme koje protekne dok laser emitira zračenje zove se laserski nalet (engl. *burst*). Npr., za sivi Berea pješčenjak, laser je podešen na E8L1R200., trajanje pulsa je 0,5 sekundi, a promjer snopa 1,27 cm. Jedan nalet od 0,5 sekundi sastoji se od 100 pulseva laserske energije (slika 6-1).



Slika 6-1. Shema uzoraka pulsiranja kod ispitivanja u više točaka (Reed et al., 2003)

Prvi niz testova sastojao se od višestrukih laserskih naleta na isto mjesto uz produljenje vremena između naleta i povećanje broja naleta. U drugom nizu ispitivanja u ovoj kategoriji, postolje koje je držalo uzorak stijena programirano je da se miče po apscisi i ordinati, kako bi se napravili testovi za veći broj točaka djelovanja laserskog snopa (slika

6-2). Za neke od testova s više točaka, laserska glava je također pomicala prema dolje simulirajući kretanje bušaće glave/dlijeta.



Slika 6-2. Skica različitih uzoraka zračenja (Reed et al., 2003)

Za ispitivanja s više točaka zračenja, mehaničko postolje je programirano da omogućiti jedan nalet, a zatim se pomakne na iduću točku djelovanja laserskog snopa za 0,5 sekundi, kada slijedi novi nalet. Ovisno o broju točaka djelovanja laserskog snopa, laser se u jednom trenutku nalazi u početnoj poziciji i tada se proces ponavlja. Za test s dvije točke, minimalno vrijeme relaksacije je 1,5 sekundi, što uključuje kretanje do druge točke poslije prvog naleta, nalet u drugoj točki te kretanje natrag na početnu poziciju. Za test s tri točke djelovanja laserskog snopa, vrijeme relaksacije je 2,5 sekundi, dok je za test s četiri točke to vrijeme 3,5 sekundi.

Razmak među točkama djelovanja laserskog snopa određen je željenim preklapanjem koje je potrebno za uklanjanje rubova između točaka zračenja. Ispitana su dva razmaka; 1,1 cm i 1,0 cm. Prema geometrijskim proračunima iz prvog proizlazi preklapanje od 6%, a iz drugog 10%.

## 6.2. Test djelovanja laserskog snopa u jednoj točki

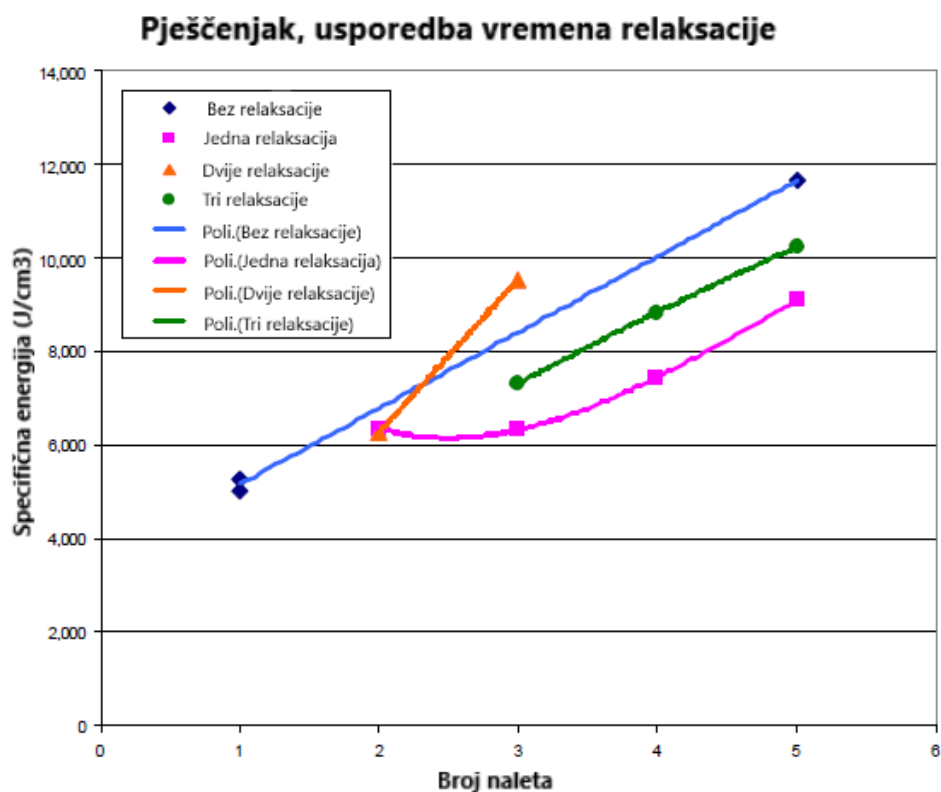
Svi testovi djelovanja laserskog snopa u jednoj točki napravljeni su pomoću Nd:YAG lasera, na uzorcima pješčenjaka, šejla i vapnenca. Laser je postavljen prema optimalnim parametrima za svaku litološku cjelinu. Za uzorke sivog Berea pješčenjaka i vapnenca, parametri su bili E8L1R200, promjer snopa na uzorku 1,27 cm, a trajanje naleta 0,5 sekundi. Za šejl, laser je programiran na E8L1R100 s promjerom snopa na uzorku od 1,27 cm te je po prvi puta korišten kolimirani (savršeno paralelni) snop (prijašnji testovi napravljeni su defokusiranim/neizoštrenim snopom). Točka djelovanja laserskog snopa je prvotno bila izložena dvama naletima s trajanjima relaksacije od jednog, dva i tri trajanja pojedinačnog naleta. Potom je slijedilo zračenje trima naletima s istim trajanjima relaksacije. Treće i četvrto ispitivanje napravljeno je s četiri i pet naleta te s vremenom relaksacije od jednog i tri vremena pojedinačnog naleta.

### 6.2.1. Rezultati ispitivanja djelovanja laserskog zračenja u jednoj točki na pješčenjaku

Rezultati ispitivanja djelovanja laserskog zračenja u jednoj točki na pješčenjaku prikazani su u tablici 6-1. Na slici 6-3 se vidi da se specifična energija uglavnom povećava s povećanjem broja naleta bez obzira na vrijeme relaksacije.

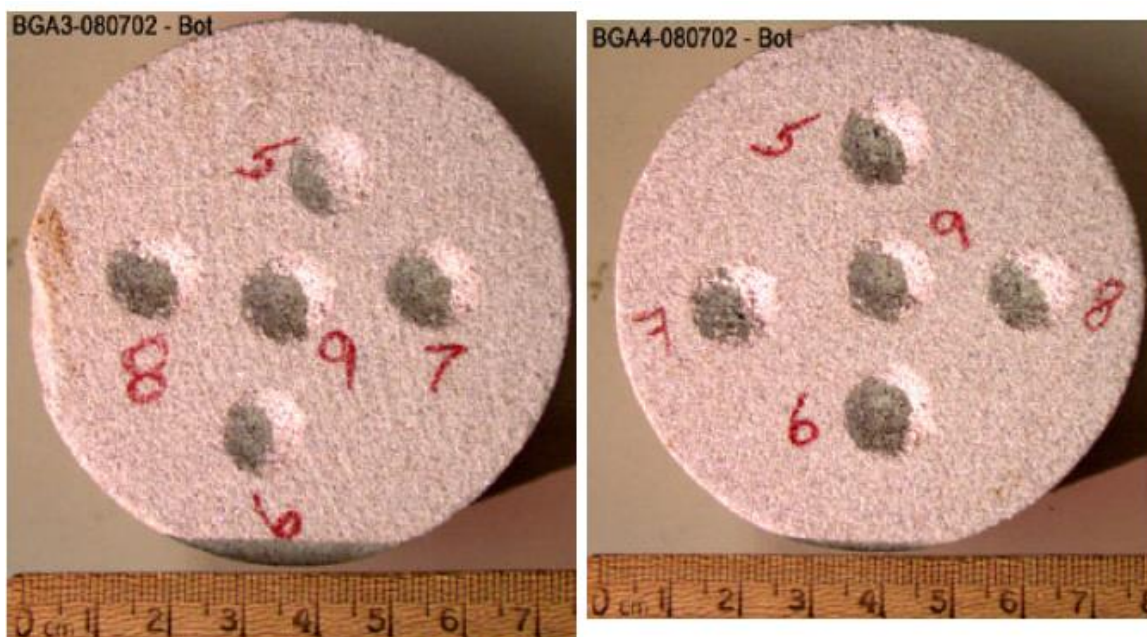
Tablica 6-1. Rezultati djelovanja laserskog zračenja u jednoj točki na uzorcima pješčenjaka (Reed et al., 2003)

Litološka jedinica	Broj uzorka	Točke zračenja	Broj naleta	Vrijeme između naleta (s)	Ukupni gubitak mase (g)	Prosječni gubitak mase po naletu (g)	Specifična energija (J/cm <sup>3</sup> )
BG	A1	7	1	0	0.240	0.240	5,040
BG	A3	5	1	0	0.240	0.240	5,303
BG	A1	8	5	0	0.540	0.108	11,666
BG	A1	1, 2 & 3	2	0.5	1.210	0.202	6,371
BG	A3	1	2	0.5	0.400	0.200	6364
BG	A1	4, 5 & 6	3	0.5	1.790	0.199	6,344
BG	A2	1, 2 & 3	4	0.5	2.040	0.170	7,464
BG	A2	4, 5 & 6	5	0.5	2.080	0.139	9,101
BG	A3	2, 3 & 4	2	1	1.220	0.203	6,270
BG	A4	7, 8 & 9	3	1	1.220	0.136	9,552
BG	A3	7, 8 & 9	3	1.5	1.570	0.174	7,323
BG	A4	1 & 2	4	1.5	1.150	0.144	8,855
BG	A4	4, 5 & 6	5	1.5	1.910	0.127	10,240



Slika 6-3. Ispitivanja u jednoj točki na uzorku pješčenjaka (Reed et al., 2003)

Tri naleta su rezultirala jednoliko većom specifičnom energijom od jednog naleta, ali obje vrijednosti su manje od one kod neprekidnog zračenja. Sa slike 6-4 je vidljivo da taljenje stijene nije osobito izraženo na niti jednom uzorku. Ispitivanje napravljeno na uzorku BG-A4 uključuje dva dulja vremena relaksacije od 1,0 i 1,5 sekundi. Točke 7,8 i 9 s tri ponavljanja i 1,0 sekundi relaksacije imaju srednju vrijednost specifične energije od 9,552 J/cm<sup>3</sup>, dok je na uzorku BG-A3, gdje je vrijeme relaksacije 1,5 sekundi, specifična energija manja.



Slika 6-4. Uzorci sivog Berea pješčenjaka nakon laserskog zračenja u više točaka (Reed et al., 2003)

Daljnjim ponavljanjem zračenja (slika 6-5), utvrđeno je da, za četiri ponavljanja, dulja vremena relaksacije rezultiraju manjom specifičnom energijom (BG-A4-1&2), ali već kod petog ponavljanja (BG-A4-4,5&6), vrijednost specifične energije se značajno povećala.



Slika 6-5. Ispitivanja u jednoj točki s više naleta na uzorku BG-A4 Top (Reed et al., 2003)

#### 6.2.2. Rezultati ispitivanja djelovanja laserskog zračenja u jednoj točki na šejlu

Za ispitivanje je odabran uzorak tamnog, organskog glinenog šejla. Nažalost, nakon prvog niza testova, nestalo je uzoraka navedenog šejla te su za daljnje ispitivanje korišteni uzorci nešto drugačijih svojstava.

Rezultati su pokazali da je šejl podložniji taljenju od pješčenjaka kada se na njega djeluje više puta u istoj točki (slika 6-6). Šejl se tako lako lomi da bi se na njega trebalo djelovati nižom gustoćom snage. Specifične energije prikazane u tablici 6-2 ukazuju da taljenje bitno utječe na učinkovitost razrušavanja šejla. Testovi s jednom točkom zračenja i jednim naletom napravljeni 2001. godine imali su najniže vrijednosti specifične energije od samo  $500 \text{ J/cm}^3$ , dok su vrijednosti specifične energije u ovim testovima višestruko veće ( $3500 \text{ J/cm}^3$ ).



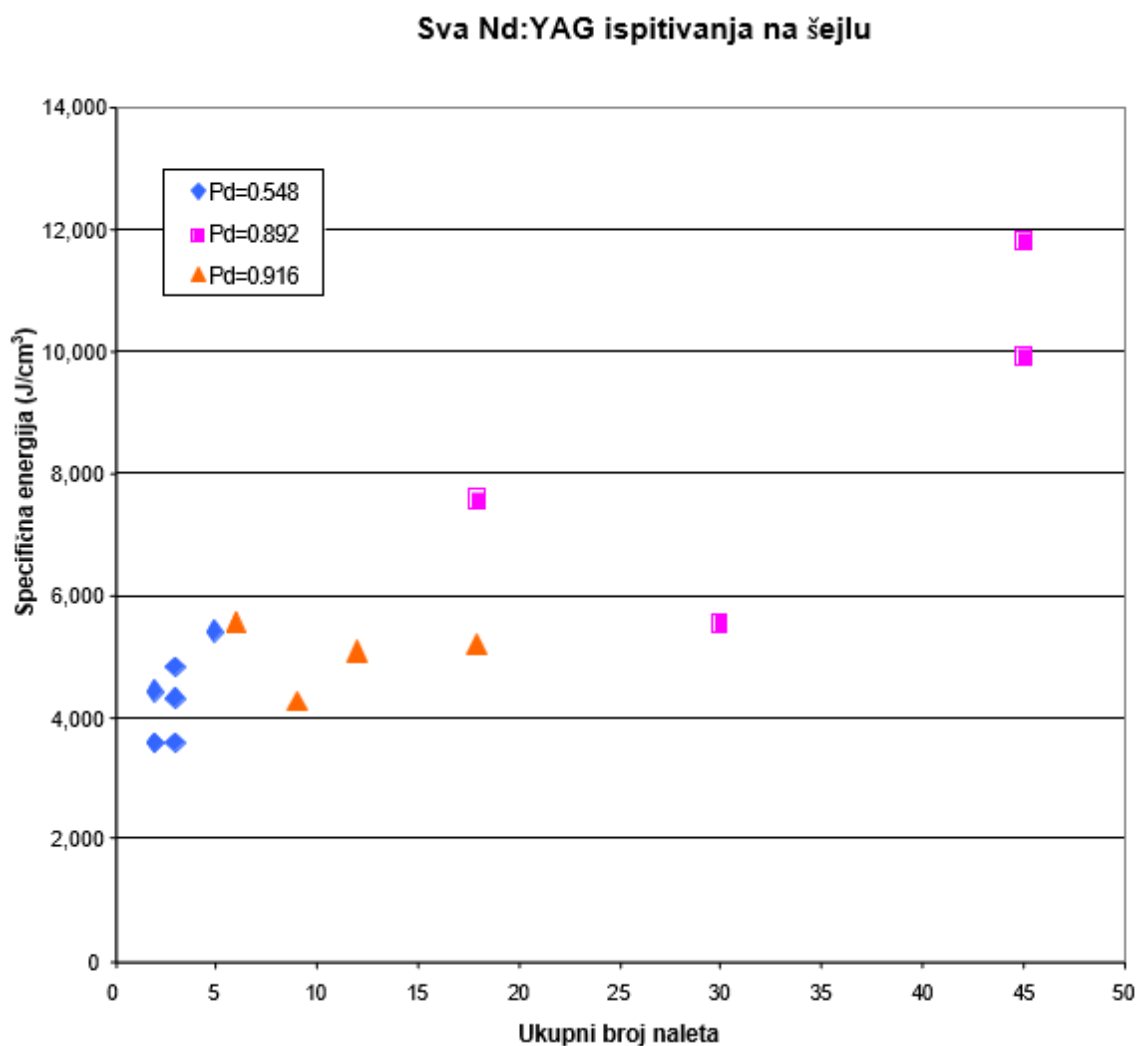


Slika 6-6. Uzorak šejla Sh1 (Reed et al., 2003)

Tablica 6-2. Rezultati laserskog zračenja u jednoj točki na uzorcima šejla (Reed et al., 2003)

Litološka jedinica	Broj uzorka	Točke zračenja	Broj naleta	Vrijeme između naleta (s)	Ukupni gubitak mase (g)	Prosječni gubitak mase po naletu (g)	Specifična energija (J/cm <sup>3</sup> )
SH	1	1	2	0.5	0.460	0.230	3,561
SH	1	2	2	0.5	0.460	0.230	3,561
SH	1	3	2	0.5	0.370	0.185	4,427
SH	1	4	3	0.5	0.510	0.170	4,817
SH	1	5	3	0.5	0.690	0.230	3,561
SH	1	6	3	0.5	0.570	0.190	4,310

Parametar, koji naizgled ima najviše utjecaja na razrušavanje šejla, je gustoća snage laserskog snopa. Na slici 6-7 prikazani su rezultati ispitivanja djelovanja laserskog zračenja na šejl u jednoj točki zračenja. Testovi u jednoj točki zračenja imali su gustoću snage gotovo istu kao i najbolji prijašnji testovi, oko 500 W/cm<sup>2</sup>, dok su testovi u više točaka imali gustoću snage jednaku kao pješčenjaci, oko 900 W/cm<sup>2</sup>.



Slika 6-7. Rezultati svih ispitivanja napravljenih na uzorcima šejla (Reed et al., 2003)

### 6.2.3. Rezultati ispitivanja djelovanja laserskog zračenja u jednoj točki na vapnencu

Kako bi se dobile dovoljno visoke vrijednosti gustoće snage laserskog snopa za dostizanje praga razrušavanja vapnenaca, promjer snopa Nd:YAG lasera morao je u prijašnjim testovima biti smanjen na 0,32 cm. To je proizvelo dovoljno visoku gustoću snage snopa za razrušavanje stijene, ali i dovelo do posljedica. Rupe (udubljenja) nastale djelovanjem laserskog zračenja su toliko uske i duboke da su bitni postali sekundarni efekti kao što su apsorpcija snopa i ponovno zračenje razrušenih čestica, što je prouzročilo povećanje specifične energije. S obzirom da se ispitivanja, na kojima se temelji ovaj rad, odnose na izradu udubljenja u više točaka, korišten je snop promjera 1,27 cm, gustoće snage od otprilike  $1 \text{ kW/cm}^2$ . Ova vrijednost gustoće snage nije bila puno veća od potrebne za razrušavanje vapnenca, a vrijednosti specifične energije su bile preko  $100\,000 \text{ J/cm}^3$ .



Rezultati navedenih ispitivanja prikazani su u tablici 6-3, ali testovi s CO<sub>2</sub> laserom, opisani u nastavku, su puno vrjedniji zbog veće prosječne snage i gustoća snage.

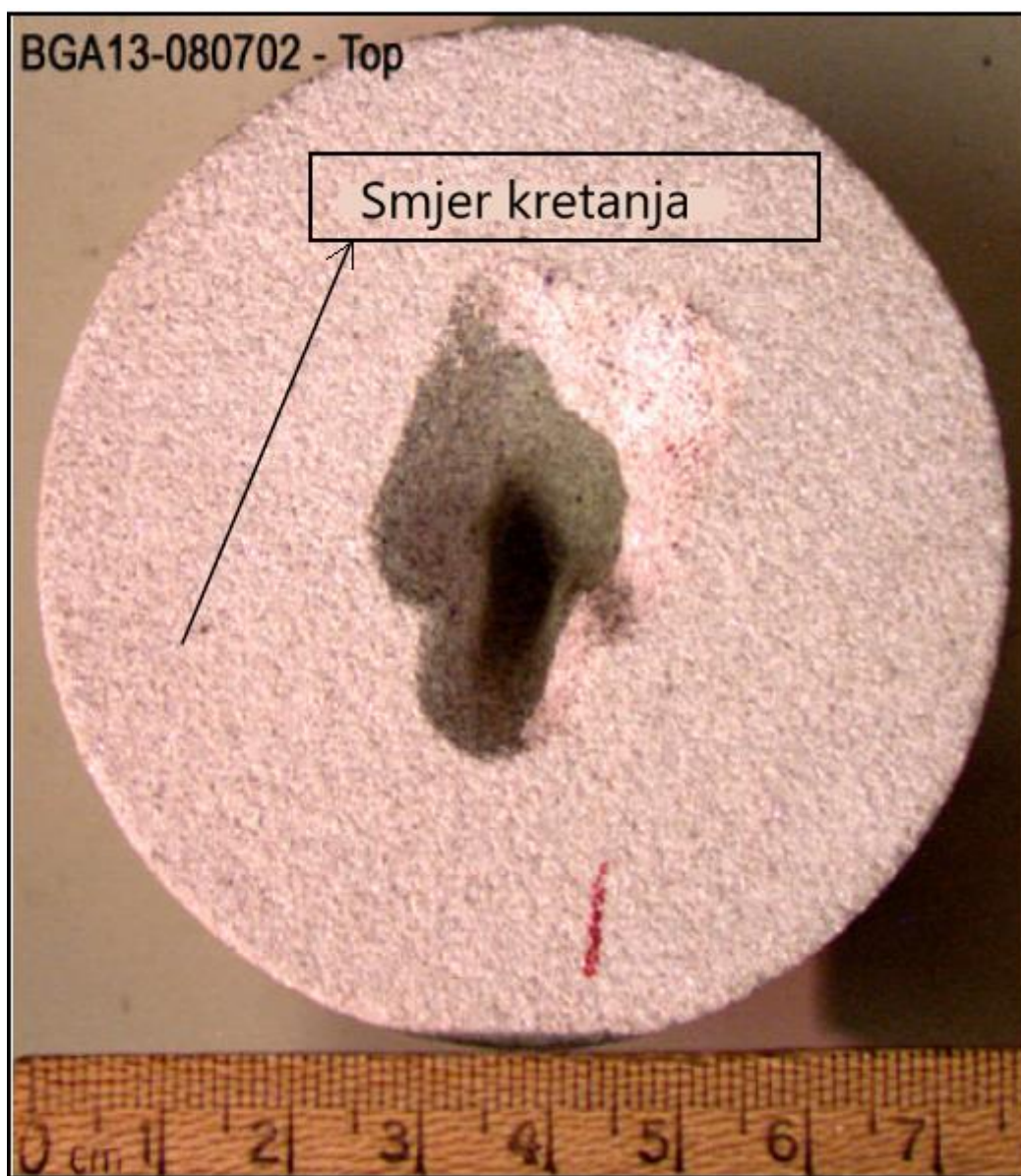
Tablica 6-3. Rezultati laserskog zračenja u jednoj točki na uzorcima vapnenca (Reed et al., 2003)

Litološka jedinica	Broj uzorka	Točke zračenja	Trajanje naleta (s)	Broj naleta	Vrijeme između naleta (s)	Ukupni gubitak mase (g)	Prosječni gubitak mase po naletu (g)	Specifična energija (J/cm <sup>3</sup> )
LS	T1	3	0.5	2	0.5	0.030	0.015	106,560
LS	T1	4	0.5	5	0	0.040	0.008	199,800
LS	T1	1	0.5	2	0.5	0.010	0.005	319,680
LS	T1	2	1	2	0.5	0.010	0.005	639,360

### 6.3. Test djelovanja laserskog snopa u više bliskih točaka

Test djelovanja laserskog snopa u više bliskih točaka trebao je biti svojevrsni nastavak ispitivanja s jednom točkom djelovanja s promjenom vremena relaksacije, razmaka točaka i broja ponavljanja zračenja. Međutim, tijekom testiranja se došlo do zaključka da će vremena relaksacije biti dulja nego kod testa s jednom točkom zbog prirode eksperimenta. Stoga je fokus testa bila promjena broja ponavljanja zračenja i razmaka između točaka. Vrijeme relaksacije u ispitivanju s dvije točke zračenja variralo je od 1,0 do 1,5 sekundi. Vrijeme relaksacije za test s tri i četiri točke nije mijenjano, već je određeno količinom vremena potrebnog da se laser vrati na početnu poziciju. Za test s tri točke djelovanja to vrijeme iznosi 2,5 sekundi, a za četiri točke, vrijeme je 3,5 sekundi.

Uzorci stijena su učvršćeni umjerenom silom da ne bi došlo do pucanja istih. Za vrijeme ispitivanja primijećeno je da uzorci nisu dobro učvršćeni te da se miču pod utjecajem ubrzanja i usporenja nosača (Slika 6-8). Taj problem je riješen dodavanjem stezaljki. Udubljenja koja su napravljena u više točaka djelovanja dala su ohrabrujuće rezultate, jer se na stjenkama nastalih udubljenja uzorci nisu rastalili, čak i kada su udubljenja postala poprilično duboka. No, udubljenja su s dubinom postajala sve manjeg promjera, bez obzira na to što je snop bio paralelan koliko je najviše bilo moguće. Ne postoji očiti razlog zašto se udubljenje sužava s dubinom. Pretpostavljeno je da će se ovaj problem eliminirati kretnjom laserske glave prema dole, tako zadržavajući konstantnu udaljenost od radne površine. Napravljeno je nekoliko testova da bi se istražila takva mogućnost, ali rezultati nisu pokazali značajnu razliku.



Slika 6-8. Pomak uzorka za vrijeme zračenja (Reed et al., 2003)

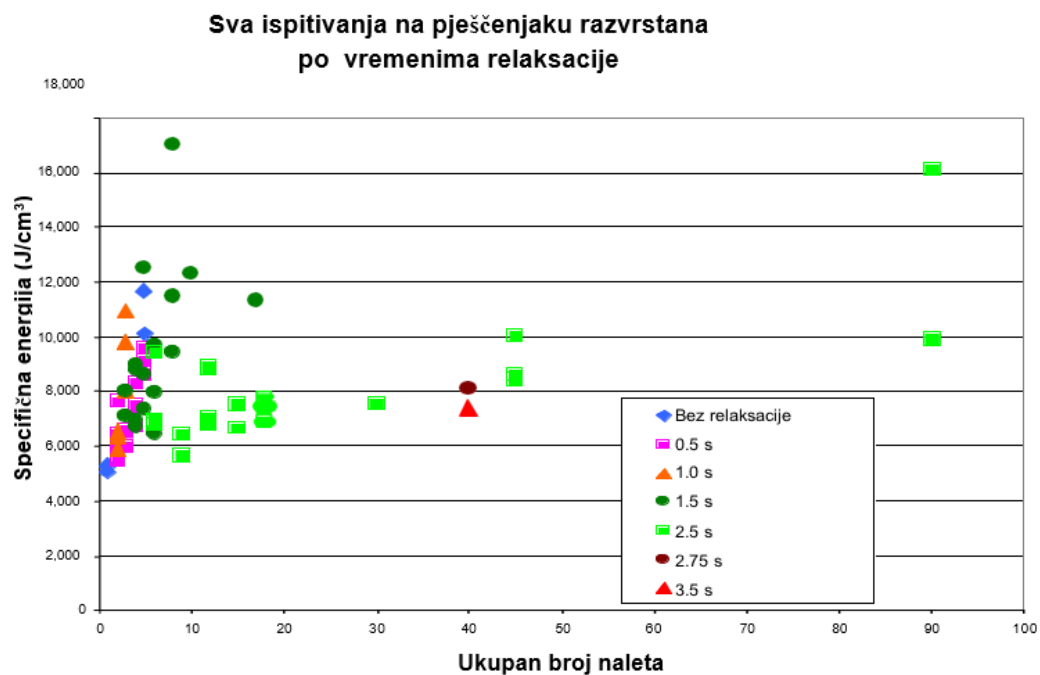
#### 6.3.1. Rezultati ispitivanja djelovanja Nd:YAG lasera u više bliskih točaka na pješčenjacima

Rezultati ovog ispitivanja prikazani su u tablici 6-4. Za testove, koji su napravljeni na istom uzorku s istim laserom i s istim ispitnim parametrima, uzete su srednje vrijednosti dobivenih rezultata da se smanji broj točaka na grafovima. Razlozi razlika u rezultatima s povećanjem vremena relaksacije nisu odmah očiti. Količina razrušenog stjenkog materijala se smanjuje sa svakim sljedećim ponavljanjem zračenja, ali nije ustanovljeno hoće li će se

taj proces izbalansirati daljnjim povećanjem vremena relaksacije. Podaci za tri ponavljanja ukazuju da hoće, ali za to treba napraviti daljnja ispitivanja. Rezultati ovog niza ispitivanja su ohrabrujući zbog toga što i test s dvije i s tri točke djelovanja laserskog zračenja pokazuju balansiranje razrušavanja stijene povećanjem broja naleta zračenja. Test s dvije točke je pokazao nagli porast specifične energije prije tog trenutka, ali kod testa s tri točke, specifična energija se neznatno povećala, što se povezuje s vremenom relaksacije. Vrijeme relaksacije u testu s tri točke bilo je 2,5 sekundi, u testu s četiri točke 3,5 sekundi, dok je u testu s dvije točke maksimalno vrijeme relaksacije bilo 1,5 sekundi (slika 6-9).

Tablica 6-4. Rezultati zračenja u dvije, tri i četiri točke na uzorcima pješčenjaka (Reed et al., 2003)

Litološka jedinica	Broj uzorka	Točke zračenja	Broj točaka	Razmak točaka (cm)	Broj naleta po točki	Gubitak mase (g)	Gubitak mase po točki (g)	Gubitak mase po točki po naletu (g)	Specifična energija (J/cm <sup>3</sup> )
BG	A5	1	2	1.1	2	0.760	0.380	0.190	6,699
BG	A5	2	2	1.1	3	0.970	0.485	0.162	7,873
BG	A5	3	2	1.1	4	0.890	0.445	0.111	11,441
BG	A5	4	2	1.27	8	0.600	0.300	0.038	33,941
BG	A5	5, 6 & 7	2	1.1	5	0.723	0.362	0.072	17,875
BG	A5	8	2	1.1	10	0.470	0.235	0.024	54,162
BG	A6	1	2	1.0	2	0.710	0.355	0.177	7,328
BG	A6	2	2	1.0	3	1.210	0.605	0.202	6,450
BG	A6	3	2	1.0	4	0.850	0.425	0.106	12,242
BG	A6	4	2	1.0	5	1.150	0.575	0.115	11,311
BG	A6	5	2	1.1	3	0.830	0.415	0.138	9,403
BG	A6	6, 7, 8 & 9	3	1.1	2	1.063	0.354	0.177	7,486
BG	A7	1 & 2	3	1.1	3	1.950	0.650	0.217	6,030
BG	A8	1, 2 & 3	3	1.1	4	2.093	0.698	0.174	7,562
BG	A8	4 & 5	3	1.1	5	2.770	0.923	0.185	7,070
BG	A9	1 & 2	3	1.1	6	2.575	0.858	0.143	9,587
BG	A10	1	3	1.1	6	3.400	1.133	0.189	6,886
BG	A11	1	3	1.1	10	4.970	1.657	0.166	7,527
BG	A11	2	3	1.1	15	5.620	1.873	0.125	9,985
BG	A12	1	3	1.1	15	6.520	2.173	0.145	8,607
BG	A14	1	4	1.1	10	6.780	1.695	0.169	7,357
BG	A14	2	4	1.1	10	6.160	1.540	0.154	8,097



Slika 6-9. Ispitivanja na pješčenjaku u jednoj, dvije, tri i četiri točke (Reed et al., 2003)

Testovi razmaka među točkama većinom su napravljeni na uzorcima pješčenjaka. Slika 6-10 prikazuje test s dvije točke djelovanja laserskog zračenja s razmacima među njima od 1,27 cm, 1,1 cm i 1,0 cm.



Slika 6-10. Uzorci BG-A5 I BG-A6. Ispitivanje broj 3 pokazalo je da razmak od 1,1 cm može ukloniti grube rubove između točaka (engl. *ridge*) (Reed et al., 2003)

### 6.3.2. Rezultati ispitivanja djelovanja Nd:YAG lasera u više bliskih točaka na šejlu

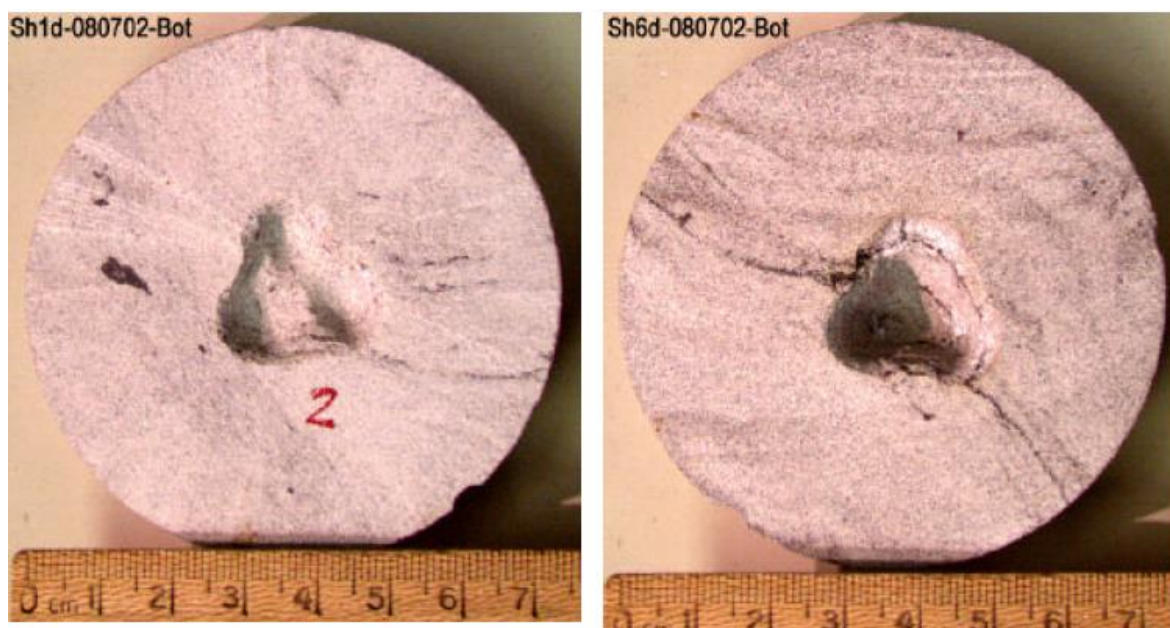
Ovaj niz ispitivanja proveden je na drugoj vrsti šejla od one kod testa s jednom točkom djelovanja zbog prije navedenog razloga. U tablici 6-5 su prikazani rezultati ispitivanja. U ovom slučaju, razrušavanje stijene je teklo puno lakše nego kod vapnenca i pješčenjaka, ali vrijednosti specifične energije su znatno veće nego kod optimiziranog testa iz 2001. godine. Razmaci među točkama djelovanja u ovom nizu ispitivanja bili su 1,1 cm kod testa s tri točke, a vrijeme relaksacije 2,5 sekundi. Ponašanje vrijednosti specifične energije slično je onom za pješčenjak, pri čemu su te vrijednosti uglavnom veće nego kod testa s jednom točkom i jednim naletom zračenja. Vrijednost specifične energije se povećava s povećanjem broja naleta, iako taljenje nije značajnije izraženo kod uzoraka s povećanim brojem naleta.



Tablica 6-5. Rezultati zračenja Nd:YAG laserom u tri točke na uzorcima šejla (Reed et al., 2003)

Litološka jedinica	Broj uzorka	Broj testa	Broj točaka	Udaljenost između središta točaka (cm)	Broj naleta po točki	Ukupan broj naleta	Promjena mase (g)	Promjena mase po naletu (g)	Specifična energija (J/cm <sup>3</sup> )
SH	1D	1	3	1.1	2	6	1.48	0.247	5,549
SH	1D	2	3	1.1	3	9	2.9	0.322	4,248
SH	3D	1	3	1.1	4	12	3.24	0.270	5,070
SH	3D	2	3	1.1	6	18	4.76	0.264	5,176
SH	4D	2	3	1.1	6	18	3.17	0.176	7,571
SH	5D	1	3	1.1	10	30	7.23	0.241	5,533
SH	6D	1	3	1.1	15	45	5.1	0.113	11,765
SH	7D	1	3	1.1	15	45	6.06	0.135	9,901

Slika 6-11 prikazuje uzorke šejla SH1D-2 s najnižom specifičnom energijom i SH6D s najvećim brojem naleta i najvišom vrijednosti specifične energije. Na uzorku SH6D vidi se ponešto rastaljenog materijala. Nije jasno zašto je kod uzorka SH6D specifična energija bila tako visoka, ali najvjerojatniji razlog je da su zbog dubine udubljenja počeli djelovati sekundarni efekti kao što su plinovi koji se izdvajaju kod razrušavanja stijene ili razrušene čestice koje ostaju unutar promjera laserskog snopa i pri tom apsorbiraju energiju.



Slika 6-11. Najniža dobivena vrijednost specifične energije (SH1D-2, lijevo) i najviša vrijednost specifične energije (SH6D, desno) (Reed et al., 2003)

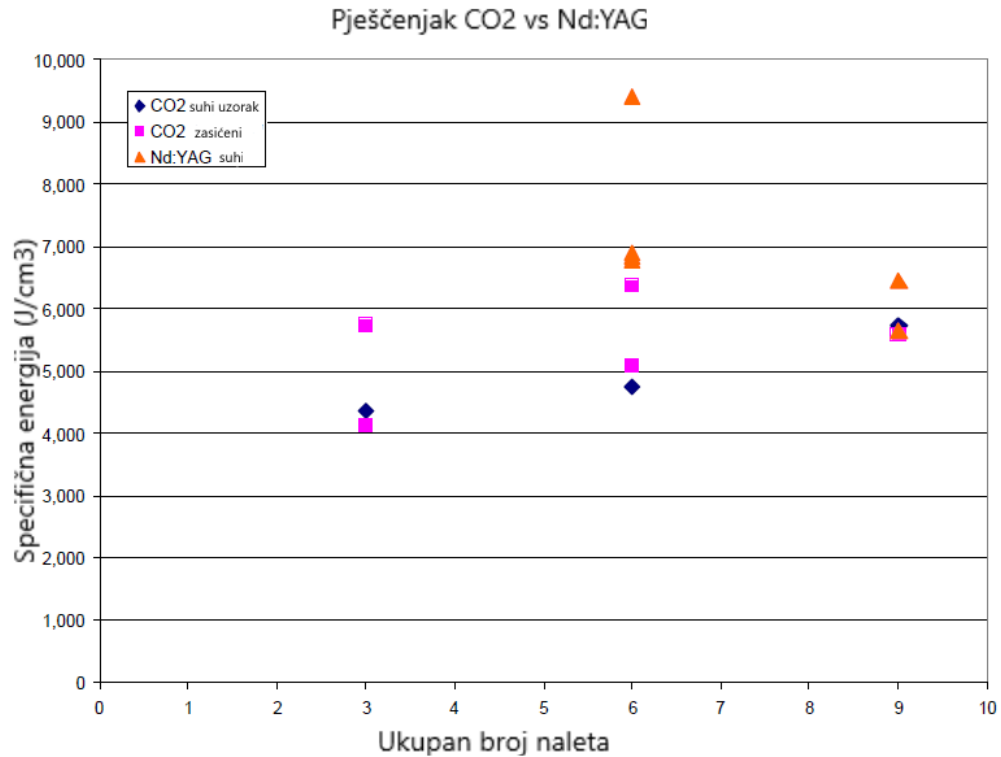
### 6.3.3. Rezultati ispitivanja djelovanja Nd:YAG lasera u više bliskih točaka na vapnencu

Temeljeno na rezultatima ispitivanja Nd:YAG lasera s jednom točkom djelovanja laserskog snopa, odlučeno je da će se daljnji testovi djelovanja laserskog snopa u više bliskih točaka napraviti samo s CO<sub>2</sub> laserom.

Postavke opreme i postupak ispitivanja su isti za obje vrste lasera. Veća prosječna snaga CO<sub>2</sub> lasera omogućila je veće vrijednosti gustoće snage kod promjera snopa od 1,27 cm, što je znatno utjecalo na rezultate ispitivanja na vapnencu.

### 6.3.4. Rezultati ispitivanja djelovanja CO<sub>2</sub> lasera u više bliskih točaka na pješčenjaku

S obzirom da se pokazalo da valna duljina zračenja značajno ne utječe na specifičnu energiju (Reed et al., 2003) (taj dio ispitivanja se nalazi u dijelu rada koji govori u utjecaju valne duljine na specifičnu energiju), glavni razlog za korištenje CO<sub>2</sub> lasera je u svrhu procjene utjecaja većih vrijednosti srednje snage i gustoće snage na vrijednosti specifične energije. Za ispitivanja na pješčenjaku, CO<sub>2</sub> laser postavljen je na 2210 W srednje snage i 1745 W/cm<sup>2</sup> gustoće snage. Radi usporedbe, Nd:YAG laser postavljen je na 1210 W srednje snage i 955 W/cm<sup>2</sup> gustoće snage. Slika 6-12 i tablica 6-7 prikazuju rezultate iz kojih se može vidjeti da su vrijednosti specifične energije slične kod oba lasera za slične parametre ispitivanja. Slika 6-13 prikazuje uzorke pješčenjaka i vapnenca nakon ispitivanja s CO<sub>2</sub> laserom.

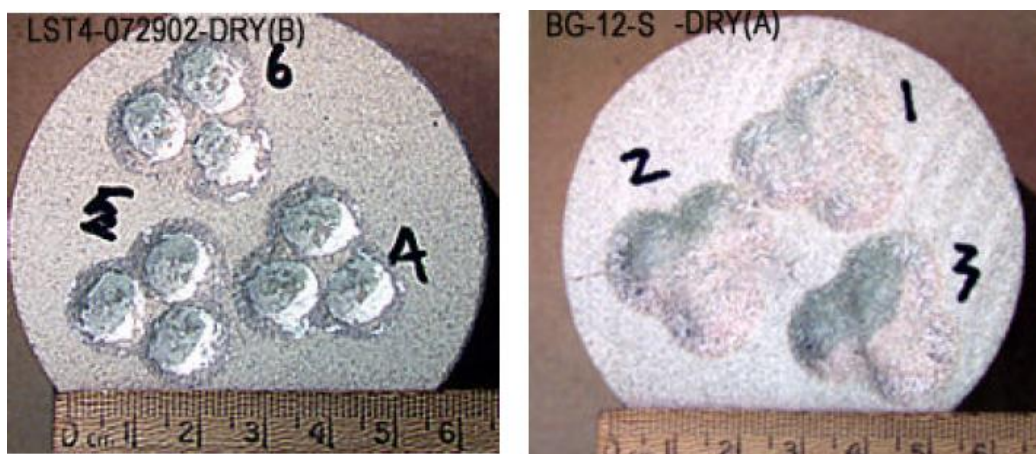


Slika 6-12. Usporedba između rezultata CO<sub>2</sub> i Nd:YAG lasera na pješčenjaku (Reed et al., 2003)

Tablica 6-6. Rezultati zračenja u dvije i tri točke na uzorcima pješčenjaka. Laserska leća se pomicala prema dolje kako je bušenje napredovalo (Reed et al., 2003)

Litološka jedinica	Broj uzorka	Broj testa	Broj naleta po točki	Ukupan broj naleta	Vrijeme između naleta (s)	Vrijeme između naleta u istoj točki(s)	Promjena mase (g)	Specifična energija (J/cm <sup>3</sup> )
BG-	12S	1	1	3	0.5	2.5	2.060	4,345
BG-	12S	2	2	6	0.5	2.5	3.760	4,761
BG-	12S	3	3	9	0.5	2.5	4.700	5,713
BG-	11S, SAT	1	1	3	0.5	2.5	2.170	4,125
BG-	11S, SAT	2	2	6	0.5	2.5	2.820	6,348
BG-	11S, SAT	3	3	9	0.5	2.5	4.810	5,582
BG-	11S, SAT	4	1	3	0.5	2.5	1.560	5,737
BG-	11S, SAT	5	2	6	0.5	2.5	3.520	5,086

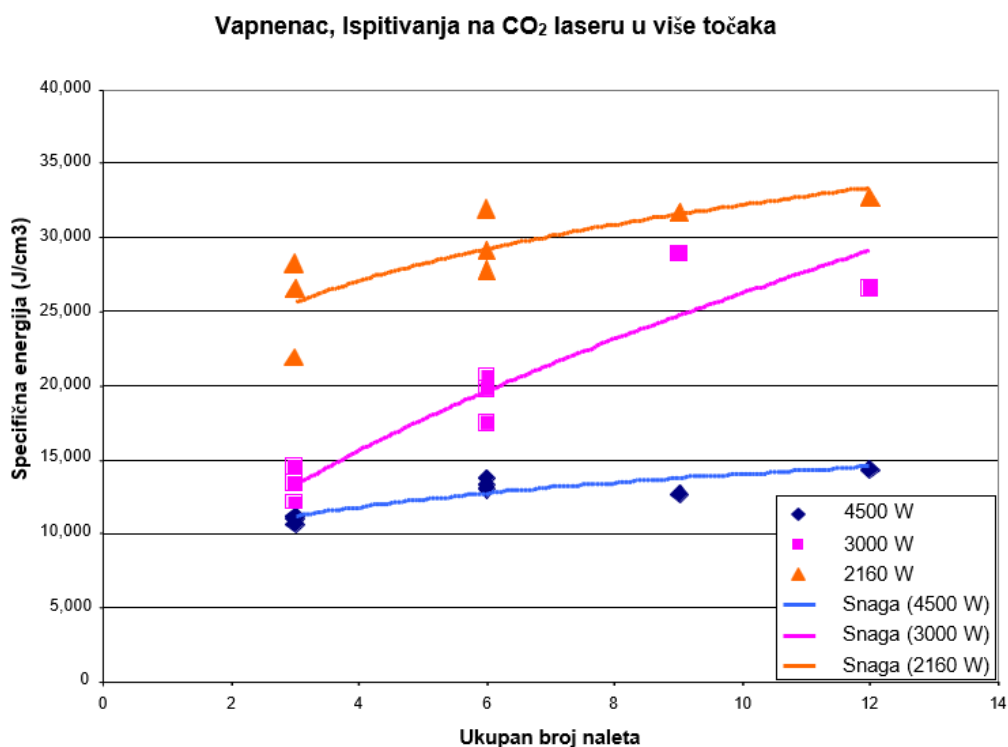




Slika 6-13. Vapnenac (LST4, lijevo) sa tri ispitivanja u tri točke i pješčenjak (BG-12-S, desno) (Reed et al., 2003)

#### 6.3.5. Rezultati ispitivanja djelovanja CO<sub>2</sub> lasera u više bliskih točaka na vapnencu

Vapnenac ima visoki energetska prag razrušavanja u usporedbi s pješčenjakom i šejlom, tj. količina energije utrošena za razrušavanje vapnenca je veća nego kod uzoraka ostalih navedenih stijena (Reed et al., 2003). Uz to, energija treba biti određene gustoće kako bi bila djelotvorna. Veća prosječna snaga CO<sub>2</sub> lasera omogućila je izradu „standardnog“ udubljenja, promjera 1,27 cm, zadržavajući gustoće snage dovoljno velikim da budu iznad praga razrušavanja. Rezultati ovog niza ispitivanja prikazani su na slici 6-14 i u tablici 6-8. Na slici 6-14, umjesto gustoće snage korištena je prosječna snaga, ali odnosi su isti. Također, može se primijetiti da nije dosegnuta granica snage, tj. veće prosječne energije bi možda mogle rezultirati daljnjim smanjenjem vrijednosti specifične energije. Vrijednosti specifične energije dobivene primjenom CO<sub>2</sub> lasera znatno su manje od onih dobivenih kod Nd:YAG lasera.



Slika 6-14. Ispitivanja CO<sub>2</sub> lasera na vapnencu (Reed et al., 2003)

Tablica 6-7. Rezultati ispitivanja CO<sub>2</sub> lasera na vapnencu (Reed et al., 2003)

Litološka jedinica	Broj uzorka	Broj testa	Gustoća snage (w/cm <sup>2</sup> )	Broj naleta po točki	Ukupan broj naleta	Vrijeme između naleta (s)	Vrijeme između naleta u istoj točki(s)	Promjena mase (g)	Specifična energija (J/cm <sup>3</sup> )
LST	4	1, 2 & 3	3552	1	3	0.5	2.5	1.677	10,874
LST	4	4, 5 & 6	3552	2	6	0.5	2.5	2.737	13,325
LST	5	1	3552	3	9	0.5	2.5	4.330	12,627
LST	5	2	3552	4	12	0.5	2.5	5.110	14,266
LST	5	3, 4 & 5	2368	1	3	0.5	2.5	0.920	13,282
LST	5	6	2368	2	6	0.5	2.5	1.390	17,482
LST	6	1 & 2	2368	2	6	0.5	2.5	1.205	20,175
LST	6	3	2368	2	6	0.5	2.5	1.260	28,929
LST	6	4	2368	3	9	0.5	2.5	1.830	26,557
LST	6	5	1705	4	12	0.5	2.5	0.330	26,509
LST	6	6	1705	1	3	0.5	2.5	0.310	28,219
LST	9	1	1705	1	3	0.5	2.5	0.400	21,870
LST	9	2, 3 & 4	1705	2	6	0.5	2.5	0.593	29,581
LST	9	5	1745	3	9	0.5	2.5	0.830	32,351
LST	9	6	1745	4	12	0.5	2.5	1.070	33,460
LST	7	1	1705	2	6	0.5	2.5	0.630	27,771

Rezultati ovih ispitivanja dali su naznake o tome kako bi laserski sustav mogao izgledati. Vrijednosti specifičnih energija dobivenih u ispitivanjima su i zabrinjavajuće i

ohrabrujuće. Ispitivanja provedena na pješčenjaku i šejlu pokazala su da specifična energija raste s povećanjem broja naleta. Dulja vremena relaksacije ukazuju na to da bi brzina bušenja mogla biti ograničena zbog čekanja do ponovnog zračenja iste točke. S druge strane, iz ispitivanja je proizašao zaključak da vapnenac reagira iznimno dobro na primjenu većih gustoća snage, dok god je promjer laserskog snopa velik u odnosu na dubinu udubljenja. Gustoća snage snopa Nd:YAG lasera je u ispitivanjima bila ispod ili na granici koja je potrebna za razrušavanje uzorka stijena i vrijednosti specifične energije su se naglo povećavale. CO<sub>2</sub> laser, koji ima puno veću prosječnu snagu, uspio je postići gustoće snage dva do četiri puta veće od Nd:YAG lasera, pritom zadržavajući isti promjer zračenja (Reed et al., 2003).

## 7. ISPITIVANJA NA UZORCIMA U TEKUĆINAMA

Skupina stručnjaka za lasersko bušenje, sastavljena od članova Argonne nacionalnog laboratorija (ANL), *Gas Technology Institute* (GTI), *Colorado School of Mines* (CSM), *Parker Geoscience Consulting* (PGC), *Halliburton Energy Service* i PDVSA, su u 2001. godini modernim laserima obradili više od 100 suhih i vodom zasićenih uzoraka pješčenjaka, vapnenca i šejla. Rezultati su pokazali da laserska tehnologija ima velik potencijal za smanjenje vremena izrade bušotine i poboljšanje proizvodnih karakteristika bušotine zbog naprednih metoda perforacijskih operacija. U cilju temeljitijeg istraživanja potencijala laserske tehnologije, stručnjaci su išli korak dalje. Odlučeno je djelomično simulirati realne bušotinske uvjete (jer se nigdje u ranijim istraživanjima nije uzimalo u obzir uvjete visokih temperatura i tlakova), koji uključuju tekućine kao što su isplaka i voda, u cilju razumijevanja slabljenja laserskog snopa u tim uvjetima te određivanja najučinkovitijih parametara za razrušavanje stijene laserom kroz tekućine. U ovom nizu ispitivanja, opisani su proces i rezultati primjene CO<sub>2</sub> lasera snage 6 kW i Nd:YAG lasera snage 1,6 kW, u dolje navedenim uvjetima:

1. slobodna voda iznad uronjenog uzorka,
2. poprečni vodeni mlaz na gornjoj plohi uzorka.

### POSTAVKE KORIŠTENE OPREME

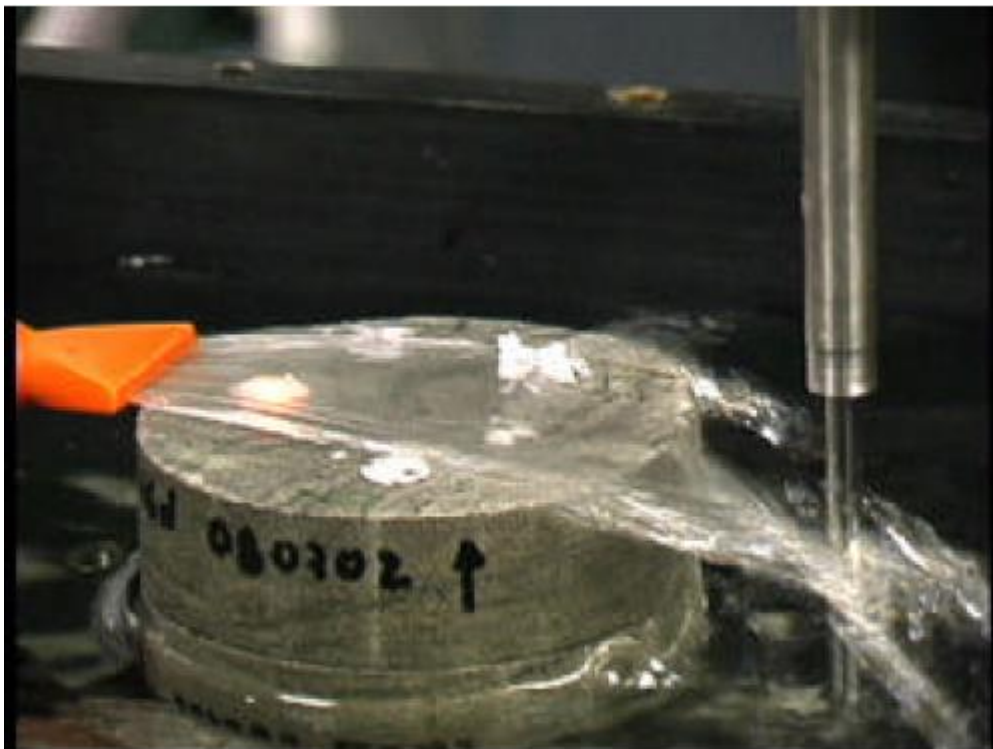
Prethodna ispitivanja, opisana u 5. poglavlju, pokazala su da zatvorena metalna posuda nije dobro rješenje za ovu vrstu testova. Ona je korištena u samo nekoliko testova, jer je omogućila korištenje vodenog mlaza preko površine uzorka, ali većina testova je napravljena u staklenoj posudi, jer je ona pružila puno bolju kontrolu debljine vodenog sloja iznad uzorka. Kao što je ranije navedeno, korištena je voda iz slavine pod tlakom od 4 bar (400 000 Pa) u dvije konfiguracije.

- **Slobodna voda iznad uronjenog uzorka**

U ovoj konfiguraciji uzorak stijene je uronjen u vodu te su provedena početna ispitivanja kako bi se odredila maksimalna debljina vodenog sloja kroz koji oba lasera mogu penetrirati. Prvo ispitivanje započelo je djelovanjem laserskog snopa na suhi uzorak, nakon čega su slijedila ispitivanja na uzorku zasićenom vodom, a zatim na uzorku uronjenom u vodu s 2 mm, 4 mm i 8 mm slobodne vode.

- **Poprečni vodeni mlaz na gornjoj plohi uzorka**

Slika 7-1 prikazuje konfiguraciju ispitivanja. U ovoj fazi ispitivanja uzorak je stavljen unutar metalne posude. Zatim je voda iz slavine kroz široku plosnatu mlaznicu puštena preko gornje plohe uzorka. Pretpostavljeno je da će stabilni mlaz učinkovito uklanjati krhotine i prašinu stvarajući tako čisti vodeni prolaz za nadolazeći laserski snop, kao što je to bio slučaj s plinom za čišćenje u testovima na suhim uzorcima. Uzorci su izvagani prije i poslije ispitivanja radi procjene specifične energije (Reed et al., 2003).



Slika 7-1. Vodena mlaznica poprečno postavljena iznad uzorka (Reed et al., 2003)

### **7.1. Vizualna procjena razrušavanja uzorka kroz sloj vode**

S obzirom da je visoki tlak plina za pročišćavanje u početnim testovima dovodio do zamućivanja vode, u nastavku ispitivanja je odlučeno da se neće koristiti takav sustav pročišćavanja. Bez pomoći plinskog mlaza kod uklanjanja krhotina, uzorak se počeo taliti i sav je materijal ostao na stjenkama uzorka. To je uvelike otežalo mjerenja gubitka mase potrebnih za određivanje specifične energije zbog čega se prionulo vizualnoj karakterizaciji razrušene površine pomoću stereo-mikroskopa. Prosječni promjer i maksimalna dubina

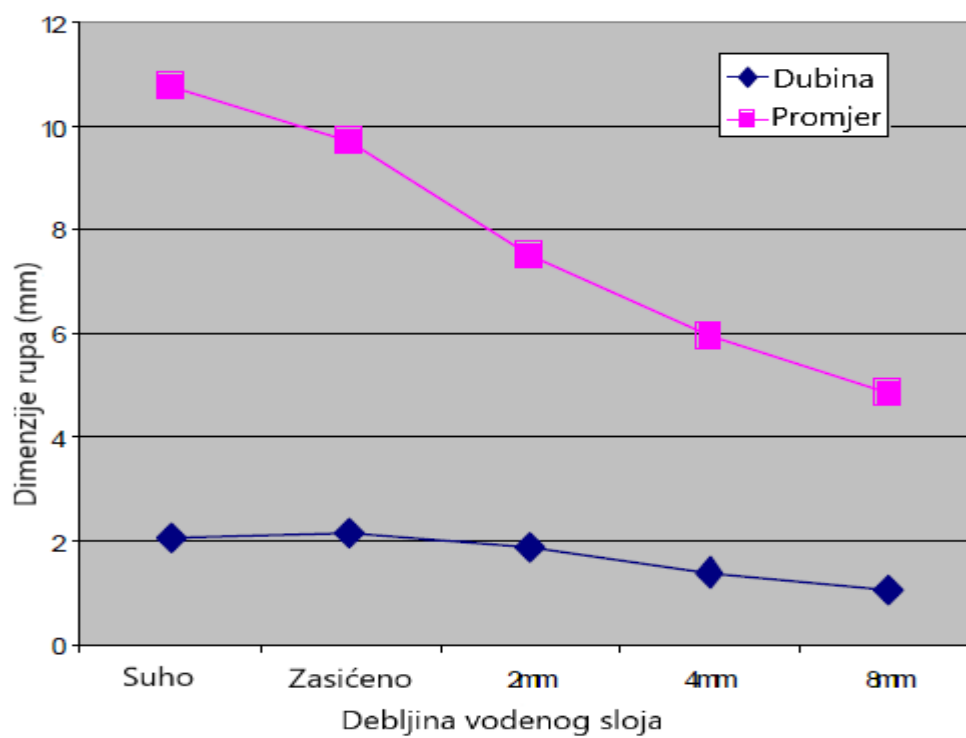
udubljenja precizno su izmjereni i ucrtani u graf kao funkcije debljine vodenog sloja iznad uzorka. Suhi uzorci i oni zasićeni vodom su također ispitani u istim uvjetima te su rezultati uvršteni u graf kao referentne točke.

## **7.2. Rezultati efekta debljine sloja slobodne vode iznad uzorka na razrušavanje Nd:YAG laserom**

Uvjeti ispitivanja i rezultati dobiveni primjenom Nd:YAG lasera prikazani su u tablici 7-1. Ispitane su četiri vrste stijena: sivi Berea pješčenjak, muljnjak, šejl i vapnenac. Debljine vodenog sloja mijenjane su od 0 mm (suhi i zasićeni uzorci) to 8 mm. Na svim stijenama je korišten laser srednje snage od 1522 W u rasporedu E32L0,5R100, a za sivi Berea pješčenjak korišten je i dodatni raspored E8L2R100 prosječne snage 1250 W. Vrijeme djelovanja lasera bilo je fiksno, 1 sekundu u većini testova. Dimenzije udubljenja na pješčenjaku kao funkcije debljine vodenog sloja za raspored E8L2R100 prikazane su na slici 7-2, a za raspored E32L0,5R100 te na slici 7-3.

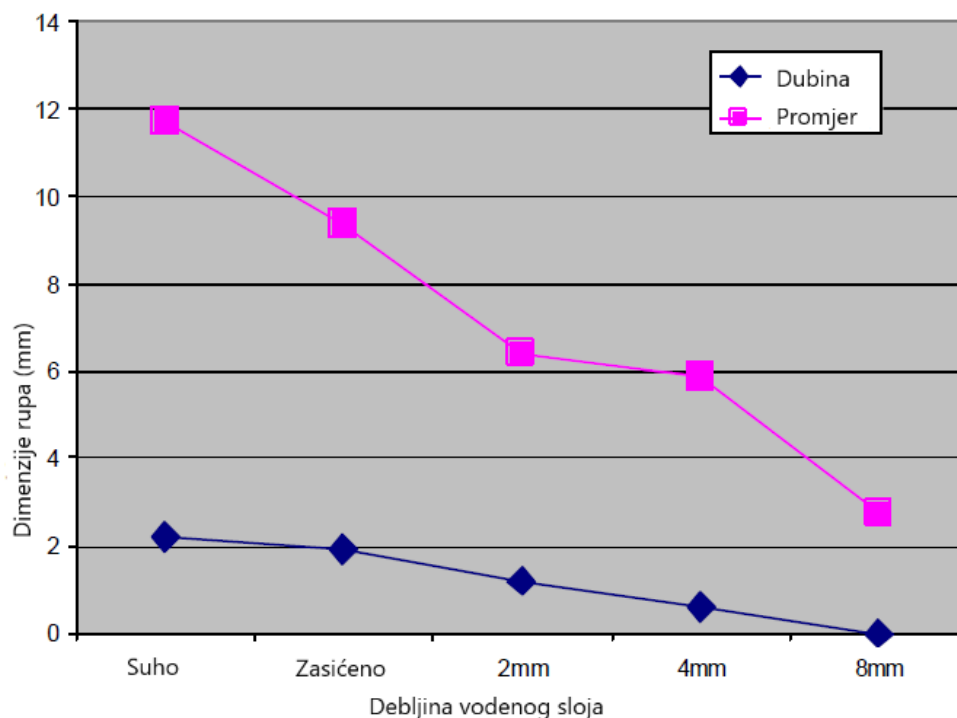
Tablica 7-1. Rezultati ispitivanja Nd:YAG lasera kroz vodeni sloj iznad uzorka (Reed et al., 2003)

Test #	Velikina točke, mm	Laserski raspored	Prosječna snaga (W)	Uzorak	Broj točaka	Vrijeme (s)	Debljina vodenog sloja	Dubina, (mm)	Promjer (mm)
<b>Pjeličnjak</b>									
1	9.2	E8L2R100	1250	BGG1A	1	1	SUHI UZORAK	1.99	10.75
2	9.2	E8L2R100	1250	BGG1A	1	1	SUHI UZORAK	2.05	10.94
3	9.2	E8L2R100	1250	BGG1A	1	1	SUHI UZORAK	2.15	10.32
4	9.2	E8L2R100	1250	BGG1A	1	0.5	SUHI UZORAK	1.22	9.71
1	9.2	E8L2R100	1250	BGG2A	3	1	ZASIĆENI	2.12	9.72
1	9.2	E8L2R100	1250	BGG3A	3	1	2MM	1.87	7.48
1	9.2	E8L2R100	1250	BGG4A	3	1	4MM	1.39	5.93
1	9.2	E8L2R100	1250	BGG5A	3	1	8MM	1.02	4.84
1	11.02	E32L0.5R100	1522	BGG6A	3	1	8MM	0.00	2.72
1-3	11.02	E32L0.5R100	1522	BGG7A	3	1	4MM	0.53	5.60
4-6	11.02	E32L0.5R100	1522	BGG7A	3	1	4MM	0.65	6.14
1-3	11.02	E32L0.5R100	1522	BGG6A	3	1	2MM	1.20	6.41
1	11.02	E32L0.5R100	1522	BGG9A	3	1	ZASIĆENI	1.92	9.36
6	11.02	E32L0.5R100	1522	BGG1A	1	1	SUHI UZORAK	2.35	11.93
7	11.02	E32L0.5R100	1522	BGG1A	1	1	SUHI UZORAK	2.18	11.72
8	11.02	E32L0.5R100	1522	BGG1A	1	1	SUHI UZORAK	2.15	11.41
<b>Muljnjak</b>									
1	11.02	E32L0.5R100	1522	ANDER WY7	1	1	SUHI UZORAK	2.55	11.08
2	11.02	E32L0.5R100	1522	ANDER WY7	1	1	SUHI UZORAK	2.44	10.69
3	11.02	E32L0.5R100	1522	ANDER WY7	1	1	SUHI UZORAK	2.88	10.55
1-3	11.02	E32L0.5R100	1522	ANDER WY1	3	1	ZASIĆENI	2.56	10.55
1-3	11.02	E32L0.5R100	1522	ANDER WY2	3	1	2MM	1.23	7.73
1-3	11.02	E32L0.5R100	1522	ANDER WY3	3	1	4MM	1.06	7.45
1-3	11.02	E32L0.5R100	1522	ANDER WY4	3	1	8MM	0.00	0.00
<b>Šepl</b>									
1	11.02	E32L0.5R100	1522	NAT R4	1	1	SUHI UZORAK	2.03	13.74
2	11.02	E32L0.5R100	1522	NAT R4	1	1	SUHI UZORAK	2.27	13.85
3	11.02	E32L0.5R100	1522	NAT R4	1	1	SUHI UZORAK	1.84	13.57
4-6	11.02	E32L0.5R100	1522	BIGH7A	3	1	ZASIĆENI	3.44	10.97
1-3	11.02	E32L0.5R100	1522	BIGH6A	3	1	2MM	3.41	8.36
1-3	11.02	E32L0.5R100	1522	BIGH8A	3	1	4MM	1.56	9.06
1-3	11.02	E32L0.5R100	1522	BIGH6B	3	1	8MM	0	0
<b>Vapnenc</b>									
1-3	11.54	E32L0.5R100	1536	LSA1Y	3	1	ZASIĆENI	1.64	8.52
1-3		E32L0.5R100	1536	LSA2Y	3	1	2MM	0	0
1		E32L0.5R100	1536	LSA2Y	1	5	2MM	0	0
1		E32L0.5R100	1536	LSA2Y	1	2	2MM	0	0
1		E32L0.5R100	1536	LSA2Y	1	2	4MM	0	0
1		E32L0.5R100	1536	LSA2Y	1	5	4MM	0	0
1		E32L1R50	1660	LSA2Y	1	10	4MM	0	0



Slika 7-2. Dimenzije udubljenja kao funkcija debljine vodenog sloja iznad uzorka sivog Berea pješčenjaka zračenog Nd:YAG laserom, rasporeda E8L2R100 (Reed et al., 2003)





Slika 7-3. Dimenzije udubljenja kao funkcija debljine vodenog sloja iznad uzorka sivog Berea pješčenjaka zračenog Nd:YAG laserom, rasporeda E33L0,5R100 (Reed et al., 2003)

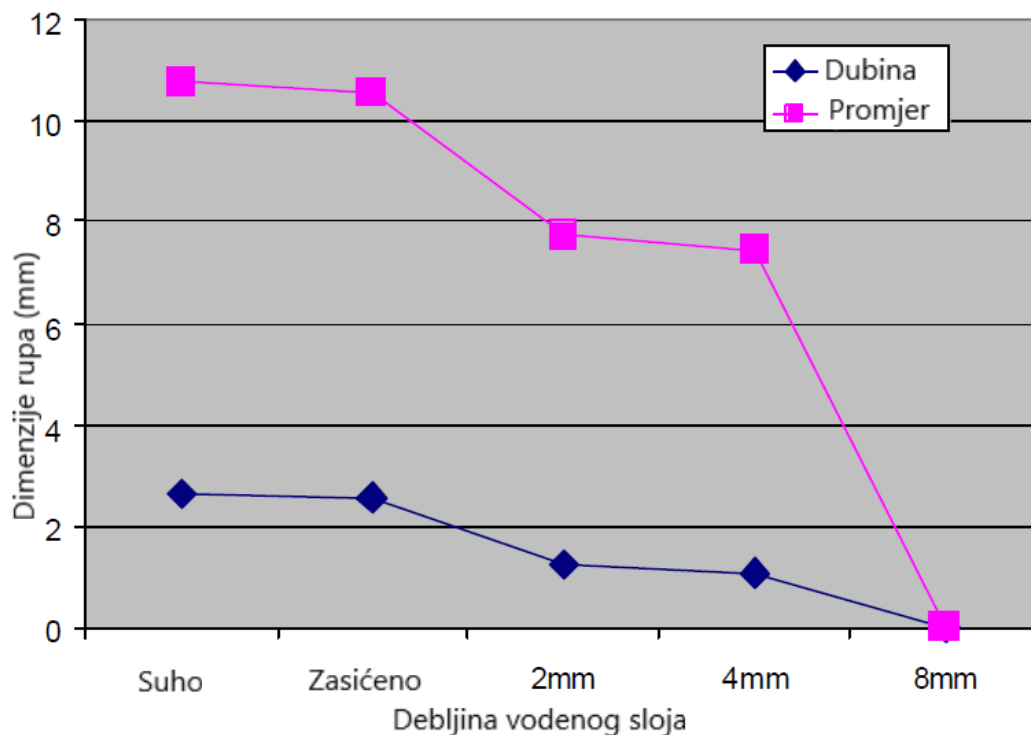
Na slici 7-4 s lijeva na desno prikazani su rezultati djelovanja laserskog snopa na uzorak pješčenjaka za sve uvjete: suhi uzorak, zasićeni uzorak, 2 mm vodenog sloja, 4 mm vodenog sloja, 8 mm vodenog sloja.



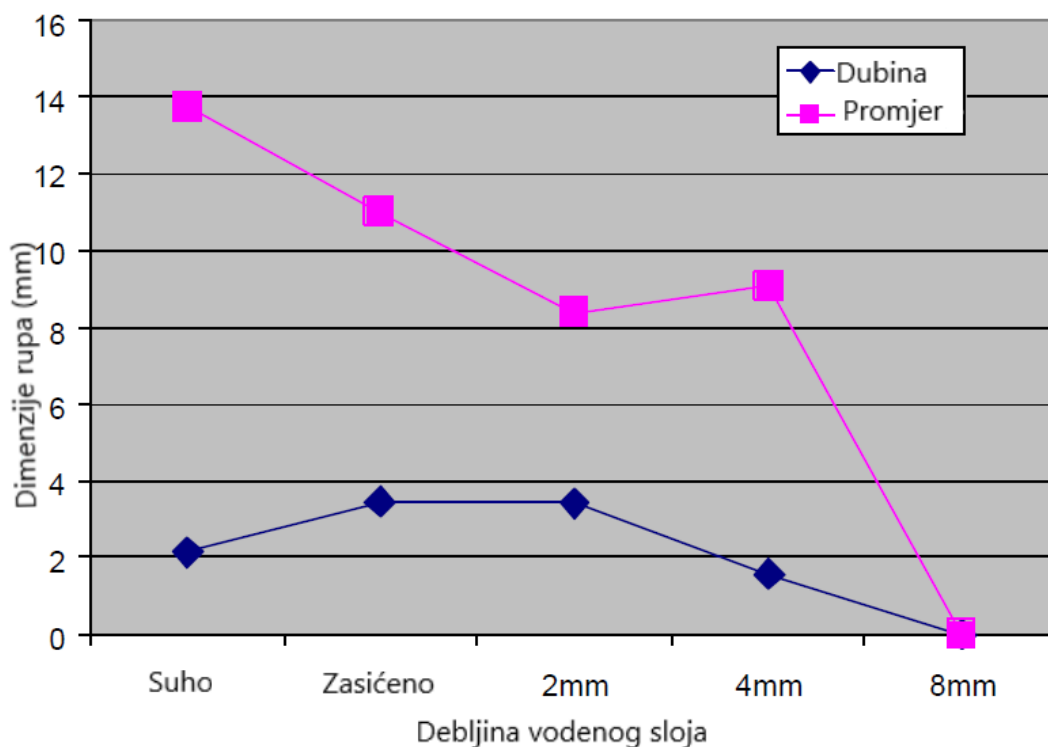
Slika 7-4. Uzorak pješčenjaka za sve uvjete vodenog sloja (Reed et al., 2003)

Pokazalo se da se veličine udubljenja smanjuju povećanjem debljine sloja vode. Taj trend je isti za sve ispitane uzorke, što se može vidjeti na slici 7-5 za muljnjak i slici 7-6 za šejl. Smanjenje intenziteta razrušavanja kroz vodu u usporedbi sa suhim uzorcima ukazuje na činjenicu da je više laserske energije utrošeno za penetriranje snopa kroz vodu, a manji dio energije je zapravo došao do uzorka kako se debljina sloja vode povećavala. Nadolazeća laserska energija djelomično se reflektirala na vodenoj površini, bivala je apsorbirana u vodi

te djelomično blokirana zbog nanosa razrušenog materijala koji je tvorio zamućeni oblak. Bez učinkovitog pročišćavanja, oblak izdvojenih plinova i krhotina zaostajao je unutar promjera snopa, što je u konačnici smanjilo količinu dostupne energije za razrušavanje. Voda je za vrijeme ispitivanja često mijenjana, jer bi se zamutila nakon obrade najviše dva uzorka. Ključanje vode je u većini testova uzrokovalo prskanje po zaštitnom staklu.



Slika 7-5. Dimenzije udubljenja kao funkcija debljine vodenog sloja iznad uzorka muljnjaka zračenog Nd:YAG laserom, rasporeda E32L0,5R100 (Reed et al., 2003)



Slika 7-6. Dimenzije udubljenja kao funkcija debljine vodenog sloja iznad uzorka šejla zračenog Nd:YAG laserom, rasporeda E32L0,5R100 (Reed et al., 2003)

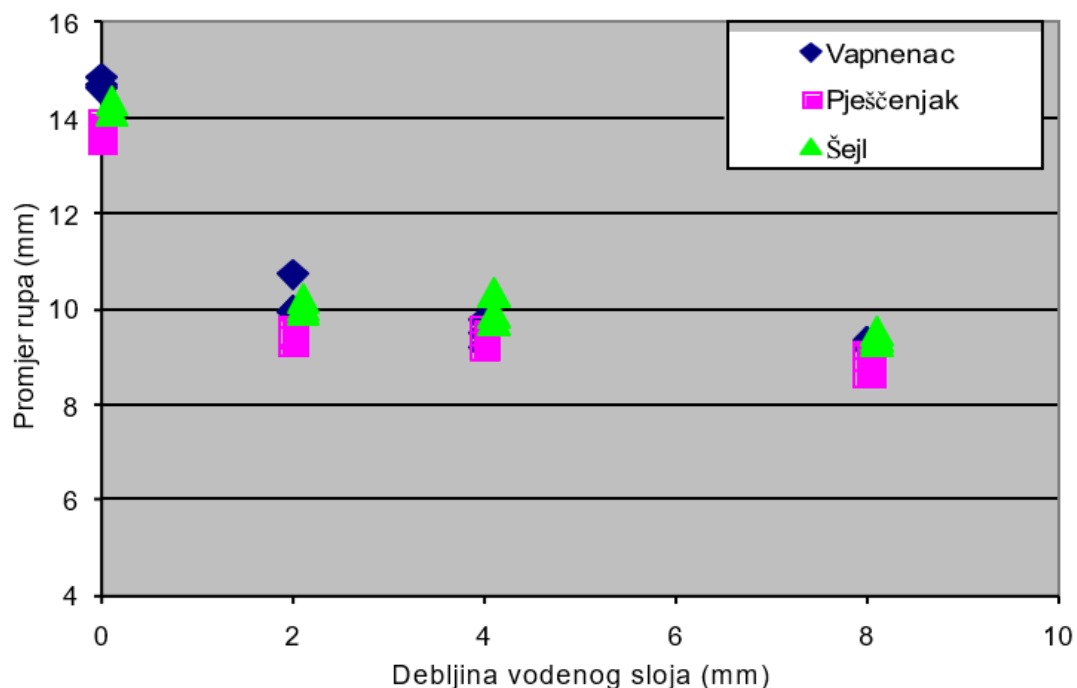
Laserski raspored E32L0,5R100 proizvodi četiri puta veću vršnu snagu od rasporeda E8L2R100. Tijekom ispitivanja primijećeno je da E32L0,5R100 proizvodi puno više prskanja vode po stjenkama zaštitnog stakla od E8L2R100 rasporeda. Čini se da je to razlog zašto su dimenzije udubljenja na pješčenjaku na koji se djelovalo laserom snage 1522 W, rasporeda E32L0,5R100 manje od onih kod lasera snage 1250 W, rasporeda E8L2R100.

Snop Nd:YAG lasera promjera 0,635 cm u rasporedu E32L0,5R100 nije napravio nikakvo značajno udubljenje na vapnencu kod niti jedne debljine vodenog sloja zbog nedostatne energije zračenja. Prijašnja istraživanja na suhim uzorcima pokazala su da se za vapnenac zahtijeva četiri puta veća energija snopa nego za pješčenjak i šejl, da bi se na uzorku vidjelo značajnije razrušavanje.

### 7.3. Rezultati efekta debljine sloja slobodne vode iznad uzorka na razrušavanje CO<sub>2</sub> laserom

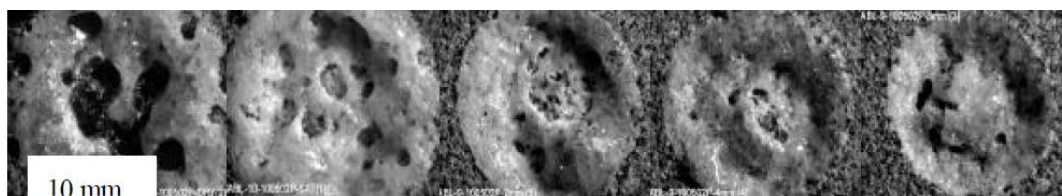
Rezultati primjene CO<sub>2</sub> lasera prikazani su na slici 7-7. Korišten je neprekidni/kontinuirani laserski snop, snage 4 kW u vremenu od 0,5 sekundi za svaku rupu.

Promjer snopa bio je 1,27 cm. Rezultati razrušavanja stijena različitih litoloških jedinica u ovom slučaju su jako slični, što je vidljivo na slici 7-7.



Slika 7-7. Dimenzije udubljenja kao funkcija debljine vodenog sloja iznad uzoraka vapnenca, pješčenjaka i šejla zračenih CO<sub>2</sub> laserom u kontinuiranom režimu snage 4 kW (Reed et al., 2003)

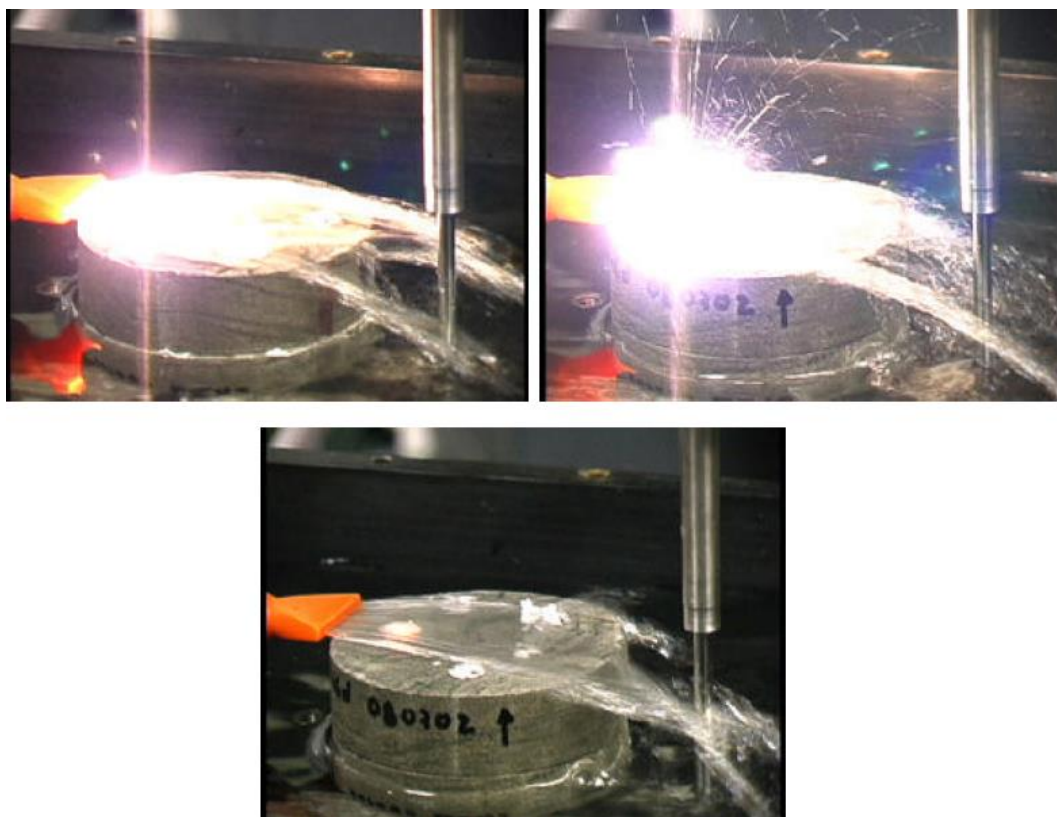
Kao što je to bio slučaj i s Nd:YAG laserom, voda je apsorbirala dio energije i smanjila količinu razrušenog materijala. Prosječni promjer udubljenja za suhe uzorke bio je 14 mm te se postepeno smanjivao s povećanjem debljine vodenog sloja. Za debljinu vodenog sloja od 2 mm, promjer je iznosio 10 mm, za 4 mm bio je 9 mm, a za 8 mm debeli sloj vode, promjer je bio 8,5 mm. Slika 7-8 prikazuje rezultate ispitivanja.



Slika 7-8. Udubljenja izbušena na uzorku šejla CO<sub>2</sub> laserom u kontinuiranom režimu snage 4 kW (Reed et al., 2003)

#### 7.4. Rezultati efekta poprečnog vodenog mlaza na razrušavanje Nd:YAG laserom

Na slici 7-9 vidljivi su rezultati djelovanja Nd:YAG lasera promjera snopa od 0,635 mm u rasporedu E8L2R100, u trajanju 1 sekunde, kroz sloj vodenog mlaza debljine 2 mm. Gornja lijeva slika prikazuje trenutak kada laserski snop dolazi do vodenog mlaza. Gornja desna slika prikazuje trenutak početka djelovanja laserskog snopa na uzorak stijene. Donja slika prikazuje da je laserska energija, koja je došla do uzorka, rastalila uzorak umjesto da ga razruši te da se pritom formiralo plitko udubljenje. Niskotlačni vodeni mlaz nije uspio ukloniti rastaljeni materijal iz udubljenja, jer su krhotine očvrsnule i stvorile staklasti sloj koji se sastojao uglavnom od kvarca ( $\text{SiO}_2$ ). Nakon formiranja staklaste faze, daljnje izlaganje laserskom snopu nije značajno povećalo dimenzije udubljenja, već je zagrijalo čitav uzorak. Iz ovog testa je zaključeno da je plinsko ili vodeno pročišćavanje tijekom zračenja laserom obavezno za učinkovito razrušavanje stijena pod vodom.



Slika 7-9. Zračenje šejla Nd:YAG laserom kroz poprečni vodeni mlaz. (Reed et al., 2003)

## 7.5. Rezultati efekta poprečnog vodenog mlaza na razrušavanje CO<sub>2</sub> laserom

Rezultat testa provedenog CO<sub>2</sub> laserom, snage 4 kW, prikazan je na slici 7-10. Vidljivo je da je laserski snop izazvao isparavanje vode iznad uzorka te da uopće nije došao do uzorka i napravio udubljenje. Za zrake CO<sub>2</sub> lasera valnih duljina 10,6 μm, voda je neprozirna, odnosno da bi laserski snop prošao kroz vodu, voda prvo mora ispariti i stvoriti svojevrstni „tunel“ za nadolazeći laserski snop. Kada se tunel stabilizira, laserski snop može doći do uzorka. Ali kod testa s vodenom mlaznicom, koja je stalno dovodila novu vodu, takvi uvjeti bili su neostvarivi.



Slika 7-10. Neuspjeli pokušaj laserskog snopa CO<sub>2</sub> lasera da razruši uzorak stijene (Reed et al., 2003)

## **8. PRIMJENA LASERA ZA PERFORIRANJE U BUŠOTINI**

Perforiranje (propucavanje) je proces probijanja otvora (perforacije) kroz kolonu zaštitnih cijevi i cementni kamen uz zadovoljavajuću dubinu prodiranja perforacije u ležišnu stijenu (Matanović i Moslavac, 2011). U tu se svrhu koriste perforatorske puške. Postupak se izvodi na način da se opremom na žici u bušotinu do ležišnog sloja spušta perforator-duga cilindrična puška. Perforacije u zaštitnim cijevima, cementnom kamenu i stijeni moguće je izraditi korištenjem perforatora sa zrnima, mlaznim perforatorima s oblikovanim eksplozivnim punjenjem, hidrauličkim (erozijskim) perforatorima i hidrauličkim (mehaničkim) sjekačima. Danas se više od 90% perforacija izrađuje mlaznim perforatorima s oblikovanim eksplozivnim punjenjem (Matanović i Moslavac, 2011). Međutim, ova tehnologija ima neke nedostatke kao što su ograničena kontrola veličine i oblika perforacija te smanjenje propusnosti perforirane stijene. Napredak u laserskoj tehnologiji pruža alternativno rješenje kao zamjenu za konvencionalno perforiranje, ponajprije zbog toga što laseri mogu kontrolirano raditi perforacije različitih veličina i oblika. Povećanje propusnosti stijene perforirane laserom već je potvrđeno (Reed et al., 2003). Prikazani niz ispitivanja daje rezultate perforiranja primjenom CO<sub>2</sub> lasera, kontinuiranim zračenjem. Napravljene su perforacije promjera 2,54 cm, dubine 5-12,7 cm

U nastavku su prikazani rezultati triju ispitanih metoda perforiranja laserom objavljenih u studiji koju je proveo C.B. Reed zajedno sa skupinom stručnjaka 2003. godine. Uvjeti ispitivanja i dubine perforacija navedeni su u tablici 8-1.

### **Metoda čišćenja :**

- I. Dvije cijevi pod kutom od 60 stupnjeva;
- II. Cijev za čišćenje kreće se zajedno s laserskim snopom pri čemu su moguće i vertikalne kretnje;
- III. Cijev je stacionarna unutar snopa te se namješta za vrijeme relaksacije.

### **Metoda perforacije:**

- I. Fiksni laserski snop;
- II. Kružni laserski snop;
- III. Rotacija uzorka.

Tablica 8-1. Rezultati ispitivanja perforiranja. (Reed et al., 2003)

Uzorak	Datum	Metoda perforiranja	Metoda čišćenja	Promjer snopa (cm)	Promjer rupe (cm)	Prosječna snaga (W)	Dubina rupe (cm)	Trajanje zračenja (s)	Bilješka
SHCT	8/2/03	I	I	2,54	2,54	4000	2,54	14	Dno otopljeno
SH10d	8/2/03	I	I	2,54	2,54	4000	2,324	10	
Sh8d	8/14/02	I	I	2,54	2,54	4630	2,54	5	
BGB3	8/14/02	I	I	2,54	2,54	4630	4,572	11	
LST2	8/14/02	I	I	1,905	1,905	4630	0,381	7,5	Plitka rupa
LST2	8/14/02	I	I	0,635	0,635	4630	1,27	4,5	Rupa do dna uzorka
LSt	10/29/02	II	II	1,27	2,54	3960	12,7	> 300	Pukotine i konusni oblik
020503	2/4/03	III	III	1,27	2,54	2500	8,255	45	10,000 %/min

## 8.1. Primjena fiksnog laserskog snopa za izradu perforacija

Na slici 8-1 prikazan je fiksni, defokusirani laserski snop promjera 2,54 cm, usmjeren na stijenu. U svrhu čišćenja površine uzorka, simetrično su postavljene dvije cjevčice pod kutom od 65 stupnjeva. Laserska glava se može micati po z-osi, kako bi se kompenzirala promjena promjera laserskog snopa kako se udubljenje nastalo njegovim djelovanjem produbljuje, ali taj pomak je ograničen cjevčicama za čišćenje i samom laserskom glavom.





Slika 8-1. Postavke prve metode (Reed et al., 2003)

Laserski snop promjera 2,54 cm iz CO<sub>2</sub> lasera snage 4 kW, uperen je na uzorak šejla, promjera 7,62 cm i debljine također 7,62 cm. Kao sredstvo za čišćenje korišten je dušik, a njegov protok na svakoj od cjevčica bio je 5,66 m<sup>3</sup>/h.

Na uzorak se djelovalo s četiri laserska naleta duljine 4 sekunde. Prva tri naleta izbušila su perforaciju dubine 7,37 cm, bez tragova taljenja stijene. Četvrti nalet nije izbušio uzorak ništa dublje, već je samo počeo taliti dno perforacije.

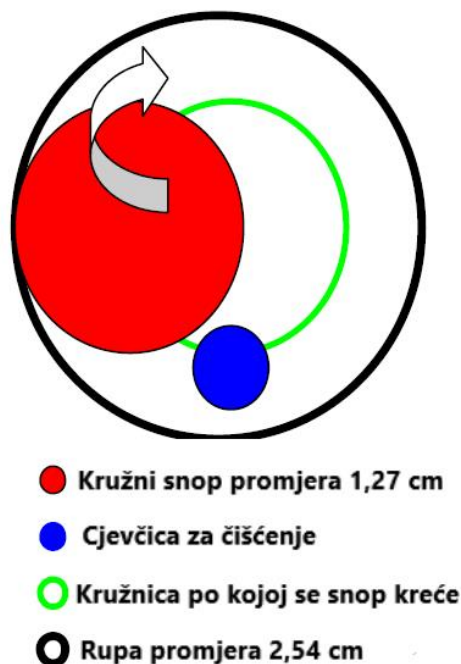
S obzirom da je svaki nalet izradio perforaciju duljine otprilike 1,5 cm, sustav fokusiranja djelovanja laserske zrake je pomaknut prema dole za 1,27 cm nakon prvog naleta te za 2,54 cm nakon trećeg naleta, u cilju održavanja konstantnog zračenja na dno perforacije. Tijekom trećeg i četvrtog naleta nastale su velike pukotine na uzorku. Na slici 8-2 prikazan je uzorak nakon četiri naleta.



Slika 8-2. Udubljenje na uzorku šejla promjera 2,54 cm i dubine 4,57 cm izbušena CO<sub>2</sub> laserom s četiri naleta u trajanju od 4 sekunde (Reed et al., 2003)

## 8.2. Primjena kružnog snopa za izradu perforacija

Tijekom ovog postupka, postolje uzorka se kružno pomicalo dok su laserski snop i cjevčica za čišćenje ostali fiksni. To je izazvalo relativno kretanje snopa promjera 1,27 cm po kružnici promjera 1,27 cm. Nakon punog kruga, napravljena je perforacija promjera 2,54 cm. Cjevčica za čišćenje kružila je zajedno sa snopom i pomicala se prema dole nakon svakog kruga zračenja kako bi se ostvarilo konstantno čišćenje dna perforacije. Slika 8-3 prikazuje relativno kružno kretanje laserskog snopa u teoriji (desno) i relativnu poziciju snopa i cjevčice za čišćenje te promjer perforacije (lijevo). Primjena ove metode omogućuje dvije velike prednosti nad ranije opisanom metodom. Cjevčica za čišćenje postavljena je unutar perforacije i može se vertikalno podešavati, što osigurava konstantno dobro čišćenje perforacije kako se njena dubina povećava. Druga prednost je ta što se dio stijene na koji djeluje laserska zraka ohladi prije nego se snop vrati na istu poziciju, tako da se izbjegava pregrijavanje i taljenje stijene.



Slika 8-3. Skica kružnog gibanja snopa (desno) i slika izbušenog udubljenja metodom kružnog snopa (lijevo) (Reed et al., 2003)

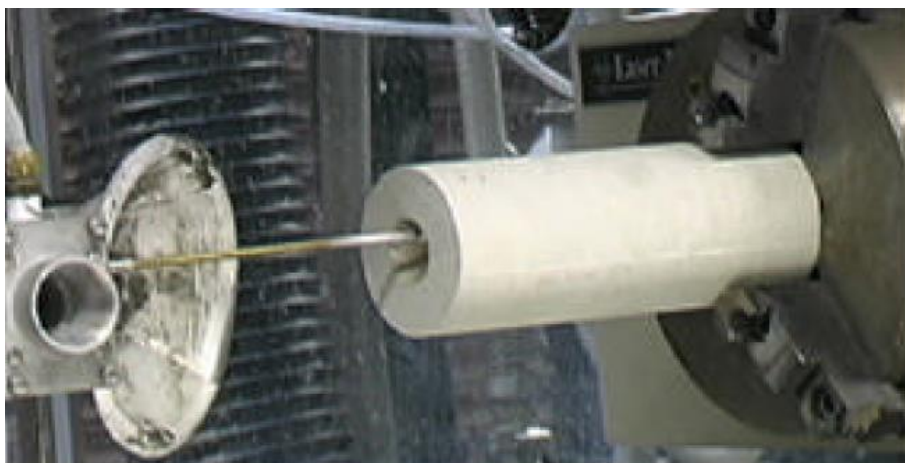
Na uzorak vapnenca promjera 10,16 cm, debljine 15,24 cm, djelovalo se kružnim snopom CO<sub>2</sub> lasera, snage 4kW. Protok dušika na cjevčici za čišćenje bio je 8,5 m<sup>3</sup>/h. Laserska glava pomicala je prema dole 1,27 cm nakon svakog naleta. U ovom slučaju, jedan nalet definiran je jednom cijelom rotacijom po kružnici. Snop se kretao brzinom od 127 cm u minuti. Na slici 8-4 prikazana je perforacija promjera 2,54 cm, dubine 12,7 cm.



Slika 8-4. Udubljenje na uzorku vapnenca izrađena CO<sub>2</sub> laserom snage 4 kW (Reed et al., 2003)

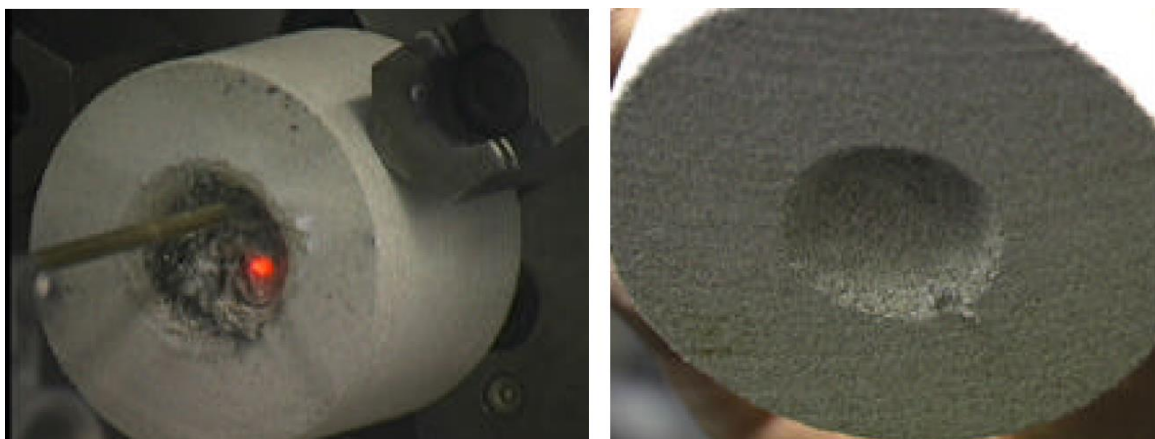
### 8.3. Primjena rotacije uzorka za izradu perforacija

Primjenom ranije opisane metode kružnog snopa, relativna pozicija laserskog snopa i cjevčice za čišćenje mijenja se konstantno, pa se tako mijenja i protok plina unutar perforacije. Rezultat toga je formiranje asimetrične perforacije. Kako bi se izbjegao ovaj problem, ispitana je treća metoda primjene lasera. Kao što je prikazano na slici 8-5, uzorak je učvršćen rotirajućom steznom glavom te rotira oko svoje osi. Laserski snop promjera 1,27 cm i cjevčica za čišćenje promjera 0,3175 cm, postavljeni su na otprilike 0,64 cm od uzorka. Fiksirani su za trajanje svakog kruga laserskog zračenja, a za vrijeme relaksacije, njihova pozicija je podešena da se zadrži konstantna točka laserskog zračenja i protok plina koji se koristi za čišćenje kako perforacija postaje dublja.



Slika 8-5. Metoda rotacije uzorka (Reed et al., 2003)

U ovom testu također je korišten CO<sub>2</sub> laser, a protok dušika bio je 7,79 m<sup>3</sup>/h. Ispitane su dvije snage (4000 W i 2500 W) i četiri brzine rotacije (10000, 5000, 3000 i 2000 stupnjeva u minuti). Kod snage od 4000 W i brzine rotacije od 3000°/min, laserski snop je intenzivno talio uzorak i stvorio je staklastu fazu koja je ostala u perforaciji (slika 8-6 lijevo). Povećanje brzine rotacije smanjilo je taljenje.



Slika 8-6. Rezultati perforiranja metodom rotacije uzorka. Lijevo: 4000 W i 3000 stupnjeva/min i desno: 2500 W i 10000 stupnjeva/min (Reed et al., 2003)

Provedena testiranja su pokazala da su optimalni uvjeti u kojima je izrađena čista perforacija bez taljenja uzorka pri 2500 W i 10000°/min, (slika 8-6 desno). Navedeni optimalni uvjeti su zatim primijenjeni na uzorak pješčenjaka debljine 17,78 cm, kako je

prikazano na slici 8-5. Laserski snop promjera 1,27 cm, koji je relativno rotirao po kružnici promjera 0,635 cm, napravio je perforaciju promjera 2,54 cm. Dubina perforacije nakon 45 sekundi laserskog zračenja bila je 8,26 cm, ali se promjer s 2,54 cm na vrhu perforacije smanjio na 0,635 cm na dnu perforacije. To se dogodilo zbog utjecaja sekundarnih efekata koji su ranije spomenuti. Perforacija je tako brzo poprimila konusni oblik i budući da primjenom ove metode nije ostvaren napredak na dubini većoj od 8,26 cm, test je zaustavljen. Kako bi ova metoda bila funkcionalna, potrebno je dizajnirati bolji sustav pročišćavanja perforacije (Reed et al.,2003).

## **9. OVISNOST SPECIFIČNE ENERGIJE O VALNOJ DULJINI ZRAČENJA LASERA**

Jedno od pitanja na koje se mora odgovoriti prije razvitka laserskog bušaćeg sustava je koji će se laser koristiti u tu svrhu. Nekoliko je aspekata koje je potrebno razmotriti, a neki od njih su (Reed et al., 2003):

- potencijal spajanja laserskog sustava na energetska mrežu;
- učinkovitost pretvaranja električne ili drugih vrsta energije u lasersku;
- učinkovitost lasera u razrušavanju stijene.

Najveći dio dosadašnjih ispitivanja napravljen je uz pomoć Nd:YAG lasera zbog njegovog opsega pulsiranja, kvalitete snopa i dostupnosti te uz pomoć CO<sub>2</sub> lasera. Valna duljina zračenja Nd:YAG lasera od 1,06  $\mu\text{m}$  je unutar bliskog infracrvenog područja, dok valna duljina zračenja CO<sub>2</sub> lasera od 10,6  $\mu\text{m}$  spada u srednje infracrveno područje (ISO 20473:2007).

Poteškoće nastaju kada se radi usporedba lasera na način da se izjednače parametri obaju lasera, u smislu da jedina varijabla bude valna duljina zračenja. Nd:YAG i CO<sub>2</sub> laseri imaju vrlo različite karakteristike pulsiranja s jako malo preklapanja. Isto tako, premda nije teško izjednačiti srednju snagu, njihova vršna snaga može biti vrlo različita. Vršna snaga Nd:YAG lasera ide do 32 puta njegove srednje snage, dok je ona za CO<sub>2</sub> laser 24 puta veća od srednje.

### **9.1. Parametri ispitivanja valne duljine**

Odabran laserski raspored za ovo ispitivanje bio je E4R400L1 za oba lasera. Prilikom ispitivanja na uzorcima na koje se djelovalo laserskim snopom Nd:YAG lasera, koja su provedena u GRI (2001), izmjerene srednje snage varirale su od 769-780 W (Reed et al., 2003). Srednja snaga za gotovo sve lasere varira iz dana u dan ovisno o faktorima kao što su vlažnost zraka u laboratoriju te starost lampi i drugih stavki vezanih uz održavanje. Kod CO<sub>2</sub> lasera, izmjerene srednje snage varirale su od 809-863 W (Reed et al., 2003). Usporedba laserskih parametara prikazana je u tablici 9-1.

Tablica 9-1. Laserski parametri za odabrane uzorke (Reed et al., 2003)

CO <sub>2</sub>					
Uzorak	Prosječna snaga (W)	Stopa ponavljanja (Hz)	Sirina pulsa (ms)	Velicina točke (cm)	Vrijeme izlaganja (s)
Vapnenac					
702LSC-1	802	400	1	0.32	0.5
702LSC-2	802	400	1	0.32	0.5
702LSC-3	802	400	1	0.32	0.5
702LSC-4	794	400	1	0.32	0.5
702LSC-5	794	400	1	0.32	0.5
702LSC-6	794	400	1	0.32	0.5
702LSC-7	802	400	1	0.32	1
702LSC-8	802	400	1	0.32	1
702LSC-9	802	400	1	0.32	1
702LSB-1	830	400	1	0.32	1
702LSB-2	830	400	1	0.32	1
702LSB-3	830	400	1	0.32	1
702LSB-4	794	400	1	0.32	1
702LSB-5	794	400	1	0.32	1
702LSB-6	794	400	1	0.32	1
Berea pješčeniak					
702BG52-1	856	400	1	1.27	0.5
702BG52-2	856	400	1	1.27	0.5
702BG52-3	856	400	1	1.27	0.5
702BG54-1	766	400	1	1.27	0.5
702BG54-2	766	400	1	1.27	0.5
702BG54-3	766	400	1	1.27	0.5
702BG53-1	766	400	1	1.27	1.5
702BG53-2	766	400	1	1.27	1.5
702BG53-3	766	400	1	1.27	1.5
702BG55-1	863	400	1	1.27	1.5
702BG55-2	863	400	1	1.27	1.5
702BG55-3	863	400	1	1.27	1.5
Sejl					
702SH8-C1	863	400	1	1.27	0.5
702SH8-C2	863	400	1	1.27	0.5
702SH8-C3	863	400	1	1.27	0.5
702SH6-B1	809	400	1	1.27	0.5
702SH6-B2	809	400	1	1.27	0.5
702SH6-B3	809	400	1	1.27	0.5
702SH13-B1	863	400	1	1.27	1
702SH13-B2	863	400	1	1.27	1
702SH13-B3	863	400	1	1.27	1
702SH15-B1	809	400	1	1.27	1
702SH15-B2	809	400	1	1.27	1
702SH15-B3	809	400	1	1.27	1
NDYAG					
Uzorak	Prosječna snaga (W)	Stopa ponavljanja (Hz)	Sirina pulsa (ms)	Velicina točke (cm)	Vrijeme izlaganja (s)
Vapnenac					
LSA3-2	769	400	1	0.32	0.5
LSA3-3	769	400	1	0.32	1.5
Berea pješčeniak					
bg10(1)	778	400	1	1.27	0.5
bg10(2)	778	400	1	1.27	0.5
bg10(3)	778	400	1	1.27	0.5
bg9(1)	778	400	1	1.27	1.5
bg9(2)	778	400	1	1.27	1.5
bg9(3)	778	400	1	1.27	1.5
Sejl					
SH15	780	400	1	1.27	0.5
SH16	780	400	1	1.27	1



### 9.1.1. Postavke korištene opreme

Promjer snopa CO<sub>2</sub> lasera postavljen je na istu vrijednost kao i Nd:YAG, kako bi se dobili jednaki promjeri udubljenja. Testovi na pješčenjaku i šejlu zahtijevali su promjer od 1,27 cm, dok je promjer snopa kod vapnenca bio 0,32 cm. Postolje je stacionarno i udaljenost između laserske glave i uzorka je konstantno. Vršna snaga lasera je 4 kW, širina pulsa 1 milisekundu a frekvencija 400/s. Rezultati su prikazani u tablici 9-2.

Tablica 9-2. Rezultati ispitivanja valnih duljina (Reed et al., 2003)

Litološka jedinica	Uzorak	Točka	Laser	Valna duljina (μm)	Prosječna izmjerena snaga (W)	Promjer točke (cm)	Površina točke (cm <sup>2</sup> )	Vrijeme izlaganja (s)	Promjena mase (g)	Bulk Density (g/cc)	Gustoća snage (W/cm <sup>2</sup> )	Specifična energija (J/cm <sup>2</sup> )
BG	52	1	CO <sub>2</sub>	10.6	856	1.27	1.27	0.5	0.151	2.15	676	6,094
BG	52	2	CO <sub>2</sub>	10.6	856	1.27	1.27	0.5	0.1121	2.15	676	8,209
BG	52	3	CO <sub>2</sub>	10.6	856	1.27	1.27	0.5	0.1694	2.15	676	5,432
BG	54	1	CO <sub>2</sub>	10.6	766	1.27	1.27	0.5	0.1746	2.15	605	4,716
BG	54	2	CO <sub>2</sub>	10.6	766	1.27	1.27	0.5	0.1578	2.15	605	5,218
BG	54	3	CO <sub>2</sub>	10.6	766	1.27	1.27	0.5	0.1418	2.15	605	5,807
BG	53	1	CO <sub>2</sub>	10.6	766	1.27	1.27	1.5	0.1428	2.15	605	17,299
BG	53	2	CO <sub>2</sub>	10.6	766	1.27	1.27	1.5	0.1244	2.15	605	19,858
BG	53	3	CO <sub>2</sub>	10.6	766	1.27	1.27	1.5	0.1185	2.15	605	20,847
BG	55	1	CO <sub>2</sub>	10.6	863	1.27	1.27	1.5	0.1755	2.15	681	15,859
BG	55	2	CO <sub>2</sub>	10.6	863	1.27	1.27	1.5	0.2124	2.15	681	13,103
BG	55	3	CO <sub>2</sub>	10.6	863	1.27	1.27	1.5	0.1268	2.15	681	21,949
BG	10	1	ND:YAG	1.06	778	1.27	1.27	0.5	0.0756	2.15	614	11,063
BG	10	2	ND:YAG	1.06	778	1.27	1.27	0.5	0.0761	2.15	614	10,990
BG	10	3	ND:YAG	1.06	778	1.27	1.27	0.5	0.0703	2.15	614	11,897
BG	9	1	ND:YAG	1.06	778	1.27	1.27	1.5	0.1942	2.15	614	12,920
LS	C	1	CO <sub>2</sub>	10.6	802	0.32	0.08	0.5	0.0988	2.70	10130	9,781
LS	C	2	CO <sub>2</sub>	10.6	802	0.32	0.08	0.5	0.0839	2.70	10130	11,519
LS	C	3	CO <sub>2</sub>	10.6	802	0.32	0.08	0.5	0.0855	2.70	10130	11,303
LS	C	4	CO <sub>2</sub>	10.6	794	0.32	0.08	0.5	0.083	2.70	10029	11,527
LS	C	5	CO <sub>2</sub>	10.6	794	0.32	0.08	0.5	0.0774	2.70	10029	12,361
LS	C	6	CO <sub>2</sub>	10.6	794	0.32	0.08	0.5	0.0847	2.70	10029	11,296
LS	C	7	CO <sub>2</sub>	10.6	802	0.32	0.08	1	0.1171	2.70	10130	16,506
LS	C	8	CO <sub>2</sub>	10.6	802	0.32	0.08	1	0.1086	2.70	10130	17,798
LS	C	9	CO <sub>2</sub>	10.6	802	0.32	0.08	1	0.1588	2.70	10130	12,171
LS	B	1	CO <sub>2</sub>	10.6	830	0.32	0.08	1	0.1255	2.70	10483	15,939
LS	B	2	CO <sub>2</sub>	10.6	830	0.32	0.08	1	0.1214	2.70	10483	16,477
LS	B	3	CO <sub>2</sub>	10.6	830	0.32	0.08	1	0.1355	2.70	10483	14,762
LS	B	4	CO <sub>2</sub>	10.6	794	0.32	0.08	1	0.1226	2.70	10029	15,608
LS	B	5	CO <sub>2</sub>	10.6	794	0.32	0.08	1	0.1108	2.70	10029	17,270
LS	B	6	CO <sub>2</sub>	10.6	794	0.32	0.08	1	0.1175	2.70	10029	16,285
LS	A3	2	ND:YAG	1.06	769	0.32	0.08	0.5	0.0637	2.70	9,713	14,547
LS	A3	4	ND:YAG	1.06	769	0.32	0.08	1	0.1053	2.70	9,713	17,600
LS	A3	3	ND:YAG	1.06	769	0.32	0.08	1.5	0.1205	2.70	9,713	23,070
SH	8	C1	CO <sub>2</sub>	10.6	863	1.27	1.27	0.5	0.6374	2.36	681	1,599
SH	8	C2	CO <sub>2</sub>	10.6	863	1.27	1.27	0.5	0.5959	2.36	681	1,710
SH	8	C3	CO <sub>2</sub>	10.6	863	1.27	1.27	0.5	0.647	2.36	681	1,575
SH	6	B1	CO <sub>2</sub>	10.6	809	1.27	1.27	0.5	0.654	2.36	639	1,461
SH	6	B2	CO <sub>2</sub>	10.6	809	1.27	1.27	0.5	0.6556	2.36	639	1,457
SH	6	B3	CO <sub>2</sub>	10.6	809	1.27	1.27	0.5	0.5718	2.36	639	1,671
SH	13	B1	CO <sub>2</sub>	10.6	863	1.27	1.27	1	0.6634	2.36	681	3,073
SH	13	B2	CO <sub>2</sub>	10.6	863	1.27	1.27	1	0.5886	2.36	681	3,463
SH	13	B3	CO <sub>2</sub>	10.6	863	1.27	1.27	1	0.8948	2.36	681	2,278
SH	15	B1	CO <sub>2</sub>	10.6	809	1.27	1.27	1	0.6582	2.36	639	2,903
SH	15	B2	CO <sub>2</sub>	10.6	809	1.27	1.27	1	0.7267	2.36	639	2,629
SH	15	B3	CO <sub>2</sub>	10.6	809	1.27	1.27	1	0.5905	2.36	639	3,236
SH	15	A2	ND:YAG	1.06	780	1.27	1.27	0.5	0.6333	2.36	616	1,455
SH	15		ND:YAG	1.06	780	1.27	1.27	0.5	0.6856	2.36	616	1,344
SH	16		ND:YAG	1.06	780	1.27	1.27	1	0.8925	2.36	616	2,064

#### 9.1.2. Ispitivanja na pješčenjaku

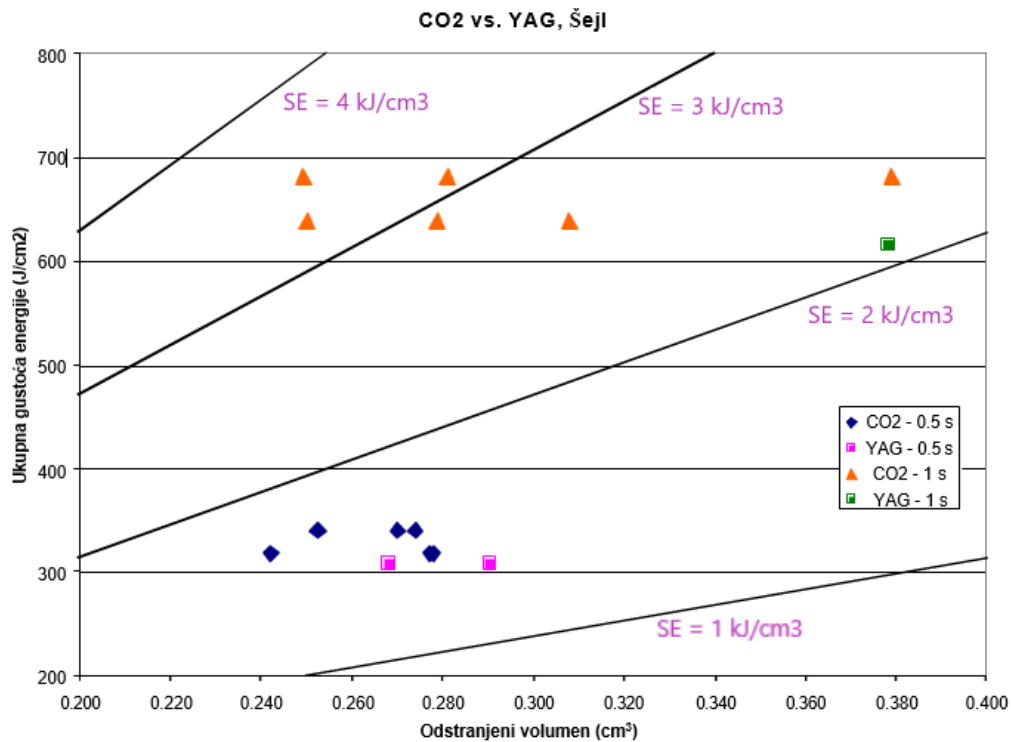
Rezultati ispitivanja na pješčenjaku pokazuju da je CO<sub>2</sub> laser najučinkovitiji na nižim energetske razinama, u rasponu specifične energije 4-10 kJ/cm<sup>2</sup>. Što je veća energija kod dužeg zračenja, CO<sub>2</sub> laser postaje manje učinkovit, najvjerojatnije zbog stvaranja staklastog sloja na uzorku.

#### 9.1.3. Ispitivanja na vapnencu

Usporedbe dvaju lasera na vapnencu su teže zbog manjih promjera laserskih snopova. Do tog zaključka se došlo tek nakon izvođenja testa s CO<sub>2</sub> laserom, kada je ustanovljeno da je za učinkovito razrušavanje vapnenca potrebna gustoća snage od otprilike 3 kW/cm<sup>2</sup>. Nd:YAG laser uz promjer snopa od 1,27 cm ima gustoću snage oko 1 kW/cm<sup>2</sup>. Promjer snopa je, kako bi se dobila potrebna gustoća snage, trebao biti smanjen, ali to stvara probleme s ranije opisanim sekundarnim efektima.

#### 9.1.4. Ispitivanja na šejlu

Rezultati ispitivanja na šejlu pokazali su najmanje razlike među laserima u odnosu na sve promatrane litološke jedinice. Na slici 9-1 se vidi da se u slučaju šejla i kod niskih i visokih energija učinci lasera ne razlikuju.



Slika 9-1. Usporedbe valnih duljina CO<sub>2</sub> i Nd:YAG lasera na uzorku šejla (Reed et al., 2003)

Usporedbe valnih duljina zračenja Nd:YAG i CO<sub>2</sub> lasera pokazale su da ne postoji bitna razlika u odstranjenoj količini materijala pomoću ta dva lasera. Nd:YAG laser je preporučen za daljnja ispitivanja zbog većeg isporučivog kapaciteta kroz optička vlakna te zbog manjeg gubitka energije u vodi. CO<sub>2</sub> laser je preporučen za korištenje u ispitivanjima koja zahtijevaju prosječnu snagu lasera veću od 2 kW.

## 10. KOMBINIRANI SUSTAV DLIJETA ZA ROTACIJSKO BUŠENJE I LASERA

Lasersko/mehaničko dlijeto radi na principu odlamanja dijelova stijene laserskim snopom. Dokazano je da temperature izazvane zračenjem lasera oslabljuju stijenu, zbog stvaranja fraktura, dehidracije minerala i isparavanja, tako povećavajući prazan prostor u stijeni. U tablici 10-1 prikazani su rezultati ispitivanja koja je proveo Shahvir Pooniwala 2006. godine. Vidljivo je da se zračenjem uzoraka veličine Youngovog modula, Poissonovog koeficijenta, obujamskog modula te kombiniranog modula stijene smanjuju u usporedbi s vrijednostima kod nezračenih uzoraka. Tako oslabljena stijena se zatim dalje razrušava korištenjem konvencionalnih tehnika mehaničkim dlijetima. Takav slijed omogućava veće brzine bušenja (Pooniwala, 2006). Svojstva lasera mogu se podešavati s površine da bi bila prikladna za određenu formaciju.

Tablica 10-1. Usporedba modula na zračenim i nezračenim uzorcima (Pooniwala, 2006)

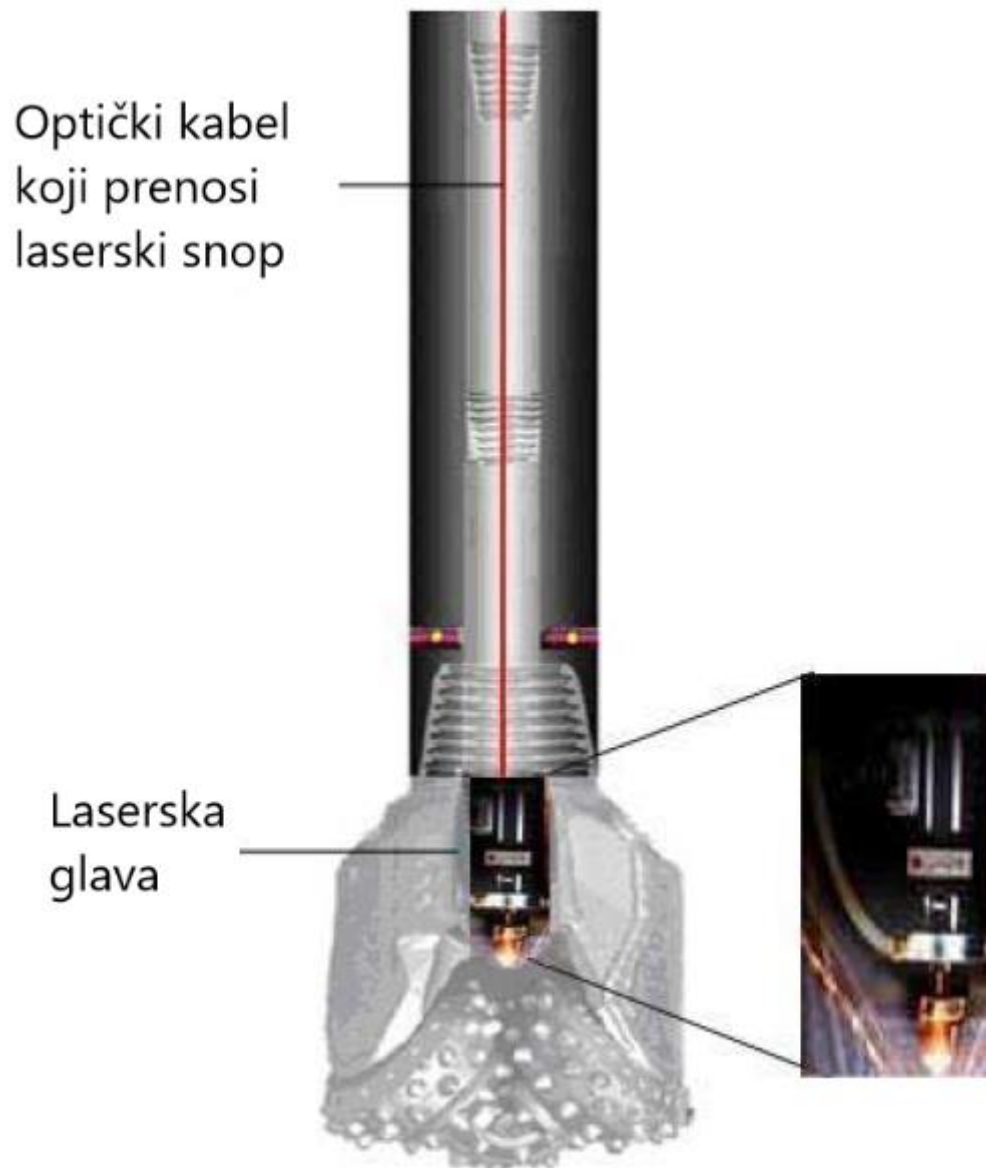
Uzorak	Youngov modul (E) kPa $\times 10^6$	Poissonov koeficijent (v)	Modul smicanja (G) kPa $\times 10^6$	Obujamski modul (K) kPa $\times 10^6$	Ukupna kompresibilnost stijene ( $C_b$ ) kPa $\times 10^{-6}$	Kombinirani modul ( $\lambda + 2G$ ) kPa $\times 10^{12}$
<b>ZRAČENI UZORCI</b>						
Žuti Berea pješčenjak	14,89	0.18	12,76	7,79	6,14	7715
Sivi Berea pješčenjak	19,10	0.29	15,24	15,44	3,10	8784
Mesaverde zaglinjeni pješčenjak	20,96	0.16	28,34	10,14	4,69	10687
Ratcliff vapnenac	65,16	0.16	30,89	31,92	1,52	28455
Frontier šejl	43,44	0.00	22,62	13,45	3,52	22201
<b>NEZRAČENI UZORCI</b>						
Žuti Berea pješčenjak	34,96	0.37	6,34	44,20	1,10	15196
Sivi Berea pješčenjak	40,47	0.33	7,38	39,37	1,24	14520
Mesaverde zaglinjeni pješčenjak	64,26	0.13	9,03	29,17	1,66	32667
Ratcliff vapnenac	77,22	0.25	27,92	51,57	0,90	29978
Frontier šejl	56,67	0.25	21,72	38,13	1,24	23042

### 10.1. Konfiguracije laserskog snopa

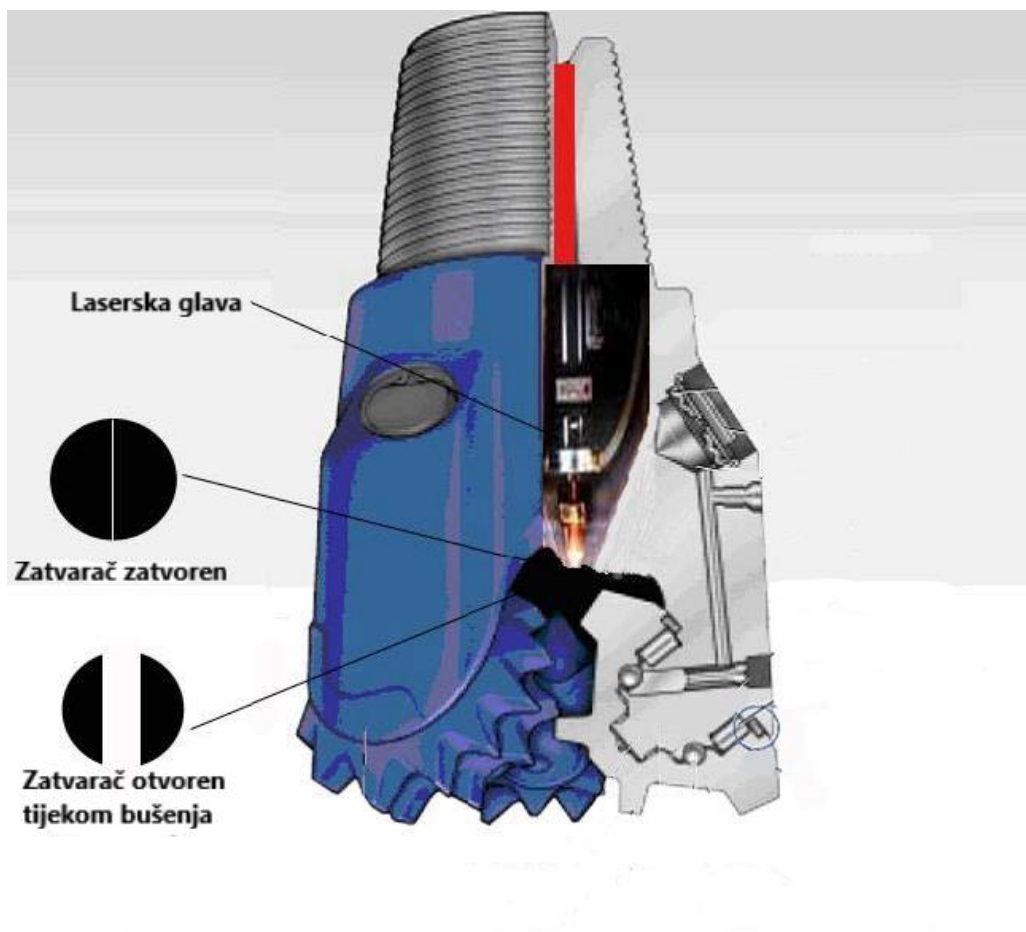
Konfiguracije laserskog snopa odnose se na prijenos proizvedenog snopa zračenja na dno bušotine. U različitim laserskim uređajima, najčešći način kojim se to postiže je

korištenjem zrcala. Međutim, s obzirom na krhkost zrcala, ona se ne mogu koristiti u svrhe izrade bušotina. Dvije najvjerojatnije konfiguracije laserskog snopa podrazumijevaju (Pooniwala, 2006):

- Sklop na površini - proizvedeni laserski snop prenosi se u bušotinu putem optičkih vlakana, koja se koriste u industrijskim laserskim uređajima. Ovakav sklop se čini jednostavnim, ali još nije ispitano njegovo djelovanje na velike udaljenosti, iako se optička vlakna upotrebljavaju za dubinske kamere, što je obećavajući faktor. Nakon prijenosa laserskog snopa optičkim kablom s površine, snop ulazi u lasersku glavu koja je integrirana u mehaničko dlijeto (slika 10-1 i slika 10-2).



Slika 10-1. Lasersko-mehaničko žrvanjsko dlijeto s optičkim kabelom kao sustavom isporuke laserske energije do dlijeta (Pooniwala, 2006)



Slika 10-2. Poprečni presjek modificiranog žrvanjskog dlijeta (Pooniwala, 2006)

- Sklop u bušotini- neki laseri, kao što je diodni laser, dovoljno su kompaktni da se cijeli sklop može spustiti u bušotinu. Osnovni zahtjev za funkcioniranje lasera je opskrba električnom energijom, koja bi se mogla proizvoditi dubinskim motorima. Takvi motori koriste se kod usmjerenog bušenja te su u stanju ostvariti izlaznu snagu veću od 1 kW (Pooniwala, 2006).

## 10.2. Laserska glava

Laserska glava služi za izlaz laserskog snopa na stijenu. Sastoji se od konvergentne ili divergentne leće koja pomaže kontrolirati snagu, promjer snopa i udaljenost fokusa snopa. Usisna cjevčica sastavni je dio svake laserske glave, jer ona čisti krhotine iz izbušene zone, koje, ako se ne uklone, mogu začepiti/zagušiti lasersku leću, što dovodi do smanjenja učinkovitosti. Dizajn dlijeta, koja se trenutno koriste u izradi bušotina, mora se modificirati

tako da laserska glava bude sastavni dio dlijeta. Laserska glava se može ugraditi kako u žrvanjska dlijeta tako i u polikristalinska (engl. *Polycrystalline Diamond Compact*, PDC), dijamantna i hibridna dlijeta, omogućujući tako bušenje u različitim uvjetima okruženja.

### 10.3. Dodatna oprema

Kako bi se ostvario optimalan učinak lasersko-mehaničkog dlijeta, potrebno je sustav opremiti još nekim dijelovima kao što su (Pooniwala, 2006):

1. **Fokusna/de-fokusna leća** - to je dodatna leća koja služi za fino podešavanje laserskog snopa. Fokusna leća konvergira laserski snop, tako smanjujući njegov promjer, dok de-fokusna leća raspršuje snop povećavajući njegov promjer.
2. **Zatvarač** - sličnu tehnologiju može se naći u kamerama. Zatvarač je napravljen od čvrstog metala, najčešće istog kao i dlijeto te je smješten na vrhu dlijeta djelujući kao zasun. Glavna svrha zatvarača je zaštita lasera kada se laser ne koristi, npr. tijekom operacija vađenja ili spuštanja bušaćeg niza u bušotinu. On sprječava ulazak krhotina i bušaćih fluida u lasersku glavu te je štiti od protutlaka i prodora slojnog fluida u bušotinu.
3. **Dubinski kablovi** - služe za različite operacije kontrole lasera, napajanja i dobivanja povratnih informacija s dna kanala bušotine.
4. **Mikroprocesori/kompjuteri** - funkcije lasera, kao što su periodičnost i intenzitet laserskih naleta, mogu se kontrolirati preprogramiranim mikroprocesorima ili putem kompjutera na površini.



## 11. ZAKLJUČAK

Mišljenje mnogih o uporabi lasera za izradu bušotina temelji se na limitiranim laboratorijskim studijama i eksperimentima koji su provedeni prije više od trideset godina, kada je primjena lasera bila u začetku. Međutim, s razvitkom laserske tehnologije, razvile su se i nove ideje u smjeru korištenja lasera u naftnoj industriji. Još je puno aspekata laserskog bušenja koji za sada ostaju nepoznanice. Uvjeti u bušotinama su puno drugačiji od onih u laboratoriju na sobnoj temperaturi i atmosferskom tlaku te i dalje nije poznato kako će bušotinski uvjeti utjecati na laserski sklop i brzinu bušenja. Ohrabrujuće je saznanje da se stijene s kojima se bušači svakodnevno susreću mogu uspješno razrušavati primjenom dostupne laserske tehnologije, ali da bi se točnije odredili granični uvjeti korištenja laserske tehnologije, potrebno je napraviti ispitivanja u uvjetima kakvi se očekuju u realnim situacijama. Kako bi se dobili vjerodostojniji rezultati, budući testovi moraju biti drugačiji od dosadašnjih u nekoliko segmenata. Struktura ispitivanja mora omogućiti trenutno pomicanje laserskog snopa s jedne točke na drugu putem optičkih vlakana, umjesto da se uzorak mehanički pomiče, a sustav pročišćavanja mora postati sastavni dio laserskog bušačkog sustava. Mlaznice moraju biti učinkovite te postavljene pod prikladnim kutom, da bi se brzo i učinkovito uklanjao sav razrušeni materijal. Dosadašnje studije su pokazale da i laserski snop CO<sub>2</sub> i Nd:YAG lasera može penetrirati kroz sloj vode određene debljine, ali stupanj razrušavanja stijena se u takvim uvjetima znatno smanjuje. Voda ima mali koeficijent apsorpcije zraka Nd:YAG lasera valne duljine 1,06 μm te laserske zrake bez većih poteškoća prolaze kroz plitke slojeve vode. S druge strane, koeficijent apsorpcije zraka CO<sub>2</sub> lasera, valne duljine 10,6 μm je velik, što znači da laserske zrake moraju ispariti svu vodu na putu do uzorka i uspostaviti stabilan „bušači tunel“ prije nego počne razrušavanje. Problem nastaje kada se za pročišćavanje koristi poprečni vodeni mlaz, zbog toga što on neprestano dovodi svježju vodu i tako uništava stabilni „bušači tunel“. Postoji više izvora slabljenja laserskog snopa, a njihovo bolje razumijevanje će uvelike pomoći kod dizajniranja budućeg laserskog sklopa. Dobru prenosnicu između rotacijskog i laserskog bušenja može stvoriti kombinirani sustav dlijeta za rotacijsko bušenje i lasera. Dakako, kao i sa svakim novim konceptom, potrebno je provesti detaljna istraživanja i napraviti studiju isplativosti.

## 12. LITERATURA

1. BAN, T., 2008. Laseri u znanosti i tehnologiji, Institut za fiziku, Zagreb
2. BJORNDALLEN, N., BELHAJ, H. A., AGHA, K. R., ISLAM, M.R., 2003. Numerical Investigation of Laser Drilling. Society of Petroleum Engineers. SPE-84844-MS.
3. DUFFNER, R. W., 1997. Airborne Laser: Bullets of Light, Plenum Publishing Corporation, New York, NY.
4. ELAHIFAR, B., ESMAEILI, A., PROHASKA, M., THONHAUSER, G., 2011. An Energy Based Comparison of Alternative Drilling Methods. Presented at the SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Muscat, Oman, 24 –26 October. SPE-148166-MS.
5. GAHAN, B. C., PARKER, R. A., BATARSEH, S., FIGUEROA, H., REED, C. B., XU, Z., 2001. Laser Drilling: Determination of Energy Required to Remove Rock. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 30 September-3 October. SPE-71466-MS.
6. GRAVES, R. M., ARAYA, A., GAHAN, B. C., PARKER, R. A., 2002. Comparison of Specific Energy Between Drilling With High Power Lasers and Other Drilling Methods. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas 29, September-2 October. SPE-77627-MS.
7. GRAVES, R. M., O' BRIEN, D. G., 1998. StarWars Laser Technology Applied to Drilling and Completing Gas Wells. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 27–30 September. SPE-49259-MS.
8. HAFEZ, A., EL-SAYED, I., EL-SAID, O., FATEEN, S.F., BESHAY, K., 2015. Laser Drilling Using Nd:YAG on Limestone, Sandstone and Shale Samples: ROP Estimation and the Development of a Constant ROP Drilling System; Presented at the SPE North Africa Technical Conference and Exhibition held in Cairo, Egypt, 14 –16 September, The American University in Cairo, Egypt.
9. HECHT, J., 1992. The Laser Guidebook, second edition, McGraw Hill, Inc., p. 211
10. HILTON, P. A., JONES, I. A., 1996. CO Laser Welding of Sheet Steel with Plasma-Disrupting Gases,” High-Power Lasers: Applications and Emerging Applications, Proceedings Europt Series, Besancon, France, Jun. 12-14, 1996, pp. 65-76
11. MATANOVIĆ, D., MOSLAVAC, B., 2011., Opremanje i održavanje bušotina, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb

12. NANRI, K., FUJIOKA, T., 1996. New Methods to Obtain Higher Power from the Laser with the Unstable Resonator. XI International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conference, Heriot-Watts University, Edinburgh, UK, Aug. 25-30.
13. O'BRIEN, D. G., GRAVES, R. M., O'BRIEN, E. A. 1999. StarWars Laser Technology for Gas Drilling and Completions in the 21st Century. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 3– 6 October. SPE-56625-MS.
14. POONIWALA, S. A., 2006. Lasers: The Next Bit. Presented at the SPE Eastern Regional Meeting, Canton, Ohio, 11–13 October. SPE-104223-MS.
15. REED, C.B., XU, Z., PARKER, R.A., GAHAN, B.C., BATARSEH, S., GRAVES, R.M., FIGUEROA, H., DEEG, W., 2003. Application Of High Powered Lasers To Drilling And Completing Deep Wells, ANL/TD/TM03-02, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois
16. SINHA, P., GOUR, A., 2006. Laser Drilling Research and Application: An Update. Presented at the SPE/IADC Indian Drilling Technology Conference and Exhibition, Mumbai, India, 16 –18 October. SPE-102017-MS.

**www.izvori:**

Laser Focus World, 2015, URL: <http://www.laserfocusworld.com/articles /print/volume-51/issue-06/world-news/gas-lasers-carbon-monoxide-laser-aims-at-high-power-applications.html> (21. 12.2017.)

International Organization for Standardization, URL: <https://www.iso.org/standard/39482.html> (21.12.2017.)

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.

---

Marin Roguljić